

张飞实战电子官方网站：www.zhangfeidz.com 点击打开  
(广告勿扰100%拒绝水贴，10名疯狂工程师运营的网站，有问必答)

CRC Press  
Taylor & Francis Group

# Transformer and Inductor Design Handbook

FOURTH EDITION

# 变压器与电感器设计手册

(第四版)

[美] Colonel Wm.T.Mclyman 卡罗尼尔·麦克莱曼 著  
周京华 龚绍文 译



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

张飞实战电子官方网站：www.zhangfeidz.com 点击打开

电气工程

# 变压器与电感器设计手册

## (第四版)

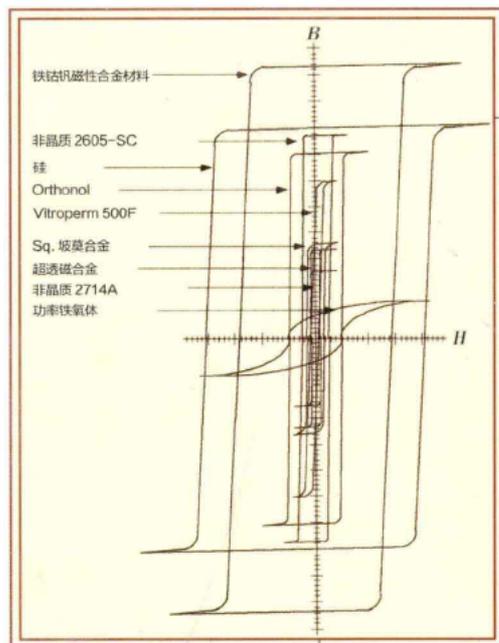
《变压器与电感器设计手册》第四版与其他书籍不同之处在于，借助其实践设计方法，主要通过用户需求 and 观点来给出信息和指南。这一经典参考读物第四版针对最新的行业发展状况做了扩展和修订，同时进行了重新组织和改进，将继续服务于寻求变压器和电感器设计最新技术应用的人员。

通过认真考虑总体系统质量、功率转换效率和成本等关键因素，作者在磁心功率处理能力方面引入了独创的新公式，希望向工程师提供更快、更严格的设计能力。本书开始阶段提供了基本的磁学基础知识，接下来使用Kg或Ap技术对设计过程进行了解释说明。本书还涵盖了叠片、带绕磁心、粉末磁心、铁氧体和铁合金等内容。

此外，新增章节包括：

- 自耦变压器设计
- 共模电感器设计
- 串联饱和和电抗器设计
- 自饱和磁放大器
- 给定阻值电感器设计

本书的目的是让电感器在符合要求的前提下能够更加轻便和小巧，帮助用户弃用大量过时的经验，从而使设计更完善、更经济。本书以逐步引导的方式展示变压器设计实例，附带大量表格和图形进行对比，是工程师、技术人员和其他从事变压器、电感器设计专业人员的指南。本书也可以作为初学者的理想入门教程，帮助他们从头开始熟悉这一领域。



关注我，关注更多好书



ISBN 978-7-5123-5062-5



定价：128.00 元

Transformer and Inductor Design Handbook  
FOURTH EDITION

# 变压器与电感器设计手册

(第四版)

[美] Colonel Wm.T.Mclyman 卡罗尼尔·麦克莱曼 著  
周京华 龚绍文 译

学习更多电源知识请关注微信公众号：电源研发精英圈  
或搜索微信号：“dianyuankaifa”关注

 中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TRANSFORMER AND INDUCTOR DESIGN HANDBOOK 4<sup>th</sup> Edition/by COLONEL WM. T. MCLYMAN/ISBN: 978-1-4398-3687-3

Copyright © 2011 by CRC Press, Inc All Rights Reserved.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版，并经其授权翻译出版。版权所有，侵权必究。

China Electric Power Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由中国电力出版社独家出版并只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。

## 图书在版编目(CIP)数据

变压器与电感器设计手册：第4版/(美)麦克莱曼 (McLyman, C. W. T.) 编著；周京华译. —北京：中国电力出版社，2014.1

书名原文：Transformer and Inductor Design Handbook, four edition

ISBN 978-7-5123-5062-5

I. ①变… II. ①麦…②周… III. ①变压器-设计-手册  
②电感器-设计-手册 IV. ①TM402-62②TM550.2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 248241 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2014年1月第四版 2014年1月北京第五次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 36印张 777千字

印数 9001—12000册 定价 128.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

献给我的妻子 *Bonnie*



## 译者的话



从事电力电子电路与系统设计、制造、测试、研究的工程师、研究者、教师和学生非常需要一些有关磁学、磁路、磁元件、磁器件的原理、分析与设计方面的书，特别是实用性很强的书，而这类书国内尚显不足。当中国电力出版社的同志拿来 [美] Colonel Wm. T. McLyman 先生著《Transformer and Inductor Design Handbook》，Third Edition, Revised and Expanded 要求我翻译成中文的时候，我虽然深知自己无论是英语水平还是专业水平都不足以把它翻译好，但我还是接受了，因为这确是一本目前国内同行十分需要且实用性很强的好书。我愿意把它介绍给国内的读者，因此我决定边学习边翻译。

关于本书的作者，在书的一开头的“序”和“前言”之后就有“关于作者”的详细介绍，这里不再赘述。

本书最大的特点是设计实例多。书中涉及变压器或电感器设计的实例共 12 类 19 个。每个例子都包括详细的设计步骤，少的也有 20 几步，多的达 50 多步。读者可以从这些设计实例中体会设计思想、设计原理，经过“消化”后，就可以把它们运用到自己的分析与设计中。书中有供分析和设计时使用的图 419 个，表 121 个，还有众多有用的设计公式。书中的文字内容既有理论分析，也有经验之谈，值得读者研究和借鉴。总之，本书是一部内容丰富、实用性很强且不可多得的作品。当然，这样一部大的著作也会不可避免地出现一些印刷、笔误、疏漏或其他方面的问题，凡有这种情况的地方译者都以“注”的形式做了自己的说明。

在本书的翻译过程中，译者得到了清华大学蔡宣三教授、江缉光教授的很多帮助，对此译者表示衷心的感谢。

由于译者的水平所限，译文一定会存在不少缺点甚至错误，译者诚挚地希望得到专家和读者的批评指正。



Colonel McLyman 是一位著名的作者、教师和磁路设计师。他以往有关变压器和电感器设计、磁心特性和变换器电路设计方法的著作已经广泛地为磁路设计师所采用。

在第四版中，Colonel McLyman 整合并订正了他以往著作中所得到的成果，还增加了五章新的内容，如自耦变压器设计、共模电感器设计、串联饱和电抗器设计、自饱和磁放大器和给定阻值电感器设计。作者涉及了包括所有有关的公式连同磁性材料和磁心特性的完整信息及磁器件设计理论。另外，他还提供了一个变压器和电感器设计的真实世界，即具有一步一步步骤的设计实例。

这本书是从事磁路设计工作工程师的必读之作。不论你从事的是高可靠的现代设计，还是大批量生产的低成本产品，这本书都是必不可少的。感谢 Colonel 给我们写了一本很好且有用的书。

Robert G. Noah

美国宾夕法尼亚州匹兹堡市  
Spang and Company 公司磁器件公司 (Magnetics)  
分部工程应用经理 (已退休)

# 前言

PREFACE



我已经强烈地要求要修订我的《变压器与电感器设计手册》一书，因为近几年电力电子学有了很大的变化。这个新版本包括 26 章。它带有新的题目，如自耦变压器设计、共模电感器设计、串联饱和电抗器设计、自饱和磁放大器和给定阻值电感器设计，还有比以前版本更多的设计例子。

本书用设计例题为电子和航空工业中的设计工程师和系统工程师们提供了实用的方法。在所有实际的电子电路中都能发现有变压器。这本书很容易被用来设计质量小<sup>①</sup>、频率高的航空变压器或低频率的工业用变压器。因此，它是一本设计手册。

在电力电子系统的功率变换过程中需要用变压器，这类元件在变换电路中常常是最重且最大的元件，变压器元件还对整个系统的性能和效率有显著的影响。因为，这样的变压器设计对整个系统的质量、功率变换效率和成本都有重要的影响。由于这些参数之间有相互制约和相互影响的关系，所以，为了获得设计的最优化，审慎地折中就是必不可少的了。

多年来，磁心制造厂对它们的磁心都提供了表明其功率处理能力的代表数字，方法是对每个磁心都提供一个被称作面积积  $A_p$  的数字，它是磁心窗口面积  $W_w$  和磁心横截面积  $A_c$  的乘积。磁心供应商用这组数字来概括在他们的产品目录中列出磁心的尺寸和电气特性。窗口面积  $W_w$  和磁心面积  $A_c$  的乘积，其量纲为长度尺寸的 4 次方。我开发出一个新的磁心功率处理能力几何常数  $K_g$  的公式， $K_g$  具有长度尺寸 5 次方的量纲。这个公式使工程师们能更快、更严格地控制他们的设计。它是一个较新的概念，磁心制造商现在也开始在他们的产品说明书中包括了它。

由于其重要性，面积积  $A_p$  和磁心几何常数  $K_g$  也被广泛用于本手册中。为了设计师的方便，书中还给出了大量的其他信息。为了使设计师能用最少量的时间做出最适合于其特定应用的折中，书中很多材料是以表格的形式给出的。

设计师们已经用过很多方法以达到合适的变压器和电感器设计，例如在很多情况下，用安排电流密度的经验法，在 1000 圆密耳/安等级的情况下就能得到很好的结果。这在很多时候是令人满意的。但是，满足这个要求计算出要用的导线尺寸可能要产生一个所希望的或真正要求的，又大又重的电感器。本书中给出的资料将可

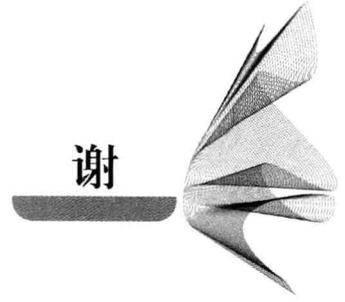
---

① 此处的“质量小”由原文“lightweight”译出，直译应为“轻重量”，但鉴于我国国家标准《量和单位》GB 3100~3102—1993 中已无重量一词，惯常所说的“重量”实际应为“质量”。因此，本译本把原书中的所有“Weight”均译为质量。

能避免用这样或那样的经验法。本书开发了一个更经济和更好的设计方法。其他能够买到的有关电子变压器的书似乎没有人用考虑用户的观点来编写，本书中的材料从头到尾都是为使见习工程师或技术员在变压器和电感器的设计中获得现代技术水平的理解而组织的。

本书作者和出版者对于有人利用本手册中所叙述或所涉及的电路、系统或过程而可能导致的对第三者的专利或其他权利的任何侵犯，不承担责任。

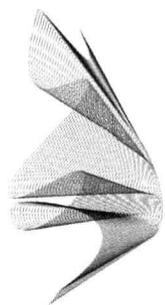
## 感 谢



在为写本书而搜集材料的过程中，本人很幸运地得到了几个公司和很多同事们的帮助和合作，我要对他们所有人表示我的感谢。如果要把他们都提到，需要列出一个很长的名单。但是，有几个人和公司的贡献是特别显著的。已经从磁技术组退休的同事 Robert Noah 和 Harry Sovisky 对本书的编排、修改给了很大的帮助。另外，在磁技术组的同事 Lowell Bosley 和他的工作人员提供了最新的产品目录和磁心样品。我要感谢 Micrometals 公司的同事 Jim Cox 和 Dale Nicol 以及 TSC International 公司的 George Orenchak。我要给 Linear Magnetics 公司的 Richard (OZ) Ozenbaugh 特别的感谢，感谢他帮助本书做了很多公式的详细推导和设计例子的核对工作。我还要感谢 Rodon Products 公司的 Steve Freeman，他建构和测试了设计例子中所用的磁元件。

我还要感谢：喷气推进实验室 (JPL) 的 Vatche Vorperian 博士，他在导出和澄清静音变换器的公式方面、Fridenberg Research 公司的 Jerry Fridenberg 在 SPICE 程序的电路建模方面、JPL 的 Wester 博士在他的投入方面和 Kit Sum 在其储能公式方面的帮助。我还要感谢已故 Robert Yahiro 的帮助和多年的鼓励。

Colonel Wm. T. McLyman



## 关于作者

最近，Colonel Wm. T. McLyman 作为加利福尼亚理工学院喷气推进实验室 (JPL) 航空电子设备组的资深成员退休了。他有 47 年磁技术领域的经历，握有 14 个有关磁学概念的专利。他在 JPL 30 年的工作中，写了超过 70 份 JPL 技术文件、新技术报告和有关磁学和功率变换电路设计的技术文章。他参与了包括火星探索飞行、向土星进军计划 (Cassini)、伽里略、向金星进军计划 (Magellan)、向火星进军计划 (Viking)、旅行者、向冥王星进军计划 (MVM)、哈勃空间望远镜以及许多其他项目在内的美国国家航空与航天管理局 (NASA) 计划。

他在美国、加拿大、墨西哥和欧洲就磁元件的设计与制造做过超过 20 年的讲座。他是一位知名且公认的磁路设计权威。他是他自己的专门从事功率磁设计的公司 Kg 磁技术公司的现任经理。

近来他完成了一本名为《高可靠磁器件的设计与制造》(High Reliability Magnetic Devices. Design and Fabrication, Marcel Dekker. Inc.) 的著作。他还通过 Kg 磁技术公司销售一种针对于变压器和电感器的名为“Titan”的磁设计与分析计算机软件 (见图 1)，这个程序可运行于 Windows 95、98、2000 和 NT。

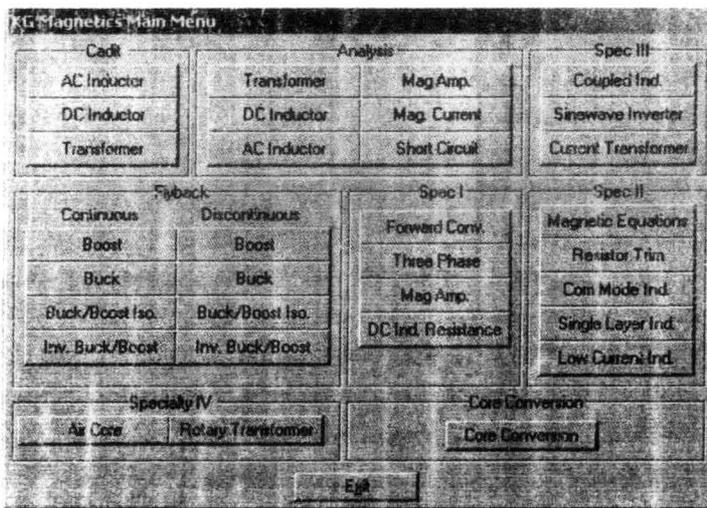


图 1 计算机设计程序的主菜单

Colonel Wm. T. McLyman(President)

Kg Magnetics, Inc.

Idyllwild, California 92549, U. S. A.

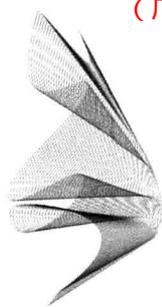
www.kgmagnetics.com; colonel@kgmagnetics.com

## 符 号

$\alpha$	调整率, %	$D_{AWG}$	导线直径, cm
$A_c$	磁心的有效截面积, $cm^2$	$D_{(min)}$	最小占空比
$A_p$	面积积, $cm^4$	$D_{(max)}$	最大占空比
$A_t$	变压器的表面面积, $cm^2$	$D_x$	休止时间占空比
$A_w$	导线面积, $cm^2$	$\overline{DM}$	差模
$A_{w(B)}$	裸导线面积, $cm^2$	$E$	电压
$A_{w(D)}$	带绝缘的导线面积, $cm^2$	$E_{line}$	线间电压(线电压)
$A_{wp}$	一次(旧称初级、原边)绕组导线面积, $cm^2$	$E_{phase}$	相线对中性线的电压(相电压)
$A_{ws}$	二次(旧称次级、副边)绕组导线面积, $cm^2$	$W$	能量, J
A-T	安匝	ESR	等效串联电阻, $\Omega$
AWG	美国线规(美国导线规格尺寸)	$\eta$	效率
$B$	磁通密度或磁感应强度, T	$f$	频率, Hz
$B_{AC}$	交流磁通密度, T	$F$	边缘磁通系数
$\Delta B$	磁通密度的变化量, T	$F_m$	磁动势, 即 mmf, A-T
$B_{DC}$	直流磁通密度, T	$F.L.$	满载
$B_m$	磁通密度, T	$G$	绕组长度, cm
$B_{max}$	最大磁通密度, T	$\gamma$	密度, $g/cm^2$
$B_c$	工作磁通密度峰值, T	$\epsilon$	趋肤深度, cm
$B_{pk}$	磁通密度峰值, T	$H$	磁场强度, 安-匝
$B_r$	剩余磁通密度, T	$H$	磁场强度, Oe
$B_s$	饱和磁通密度, T	$H_c$	使磁通返回零所需的磁场强度(矫顽力——译者注), Oe
$C$	电容	$\Delta H$	磁场强度变化量, Oe
$C_n$	新电容	$H_o$	工作磁场强度的峰值, Oe
$C_p$	集总参数电容	$H_s$	饱和处的磁场强度, Oe
$C_s$	杂散电容	$I$	电流, A
CM	圆密耳	$I_c$	充电电流, A
CM	共模	$I_c$	控制电流
$D$	驻留时间占空比	$\Delta I$	电流变化量, A
		$I_{DC}$	直流(DC)电流, A

$I_g$	门电流	$\overline{MA}$	磁放大器
$I_{in}$	输入电流, A	mks	米-千克-秒
$I_{Line}$	输入线电流, A	MLT	平均匝长, cm
$I_{phase}$	输入相电流, A	mmf	磁动势, 即 Fm, A-T
$I_m$	磁化电流, A	MPL	磁路长度, cm
$I_o$	负载电流, A	mW/g	毫瓦/克
$I_{o(max)}$	最大负载电流, A	$\mu$	磁导率
$I_{o(min)}$	最小负载电流, A	$\mu_i$	初始磁导率
$I_p$	一次电流, A	$\mu_{\Delta}$	增量磁导率
$I_s$	二次电流, A	$\mu_m$	磁心材料磁导率
$I_{s(phase)}$	二次相电流, A	$\mu_o$	空气磁导率
$I_{s(line)}$	二次线电流, A	$\mu_r$	相对磁导率
$J$	电流密度, A/cm <sup>2</sup>	$\mu_e$	等效磁导率
$K_c$	铜损常数	$n$	匝比
$K_c$	准电压波形系数	$N$	匝数
$K_{cw}$	控制绕组系数	N. L.	无载
$K_e$	电系数	$N_L$	电感匝数
$K_f$	波形系数	$N_n$	新匝数
$K_g$	磁心几何常数, cm <sup>5</sup>	$N_p$	一次匝数
$K_j$	与电流密度相关的常数	$N_s$	二次匝数
$K_s$	与表面面积相关的常数	$P$	功率, W
$K_u$	窗口利用系数	$P_{Cu}$	铜损, W
$K_{up}$	一次窗口利用系数	$P_{Fe}$	磁心损耗或铁损, W
$K_{us}$	二次窗口利用系数	$P_g$	气隙损耗, W
$K_{vol}$	与体积相关的常数	$P_{gain}$	功率增益, 因数
$K_w$	与质量相关的常数	$\Phi$	磁通, Wb
$L$	电感, H	$P_{in}$	输入功率, W
$L_c$	开路电感, H	$P_L$	电感器的铜损, W
$L_c$	控制绕组电感	$P_o$	输出功率, W
$L_p$	一次电感, H	$P_p$	一次铜损, W
$l$	线(长度)尺寸	$P_s$	二次铜损, W
$L_{(crrt)}$	临界电感	$P_{\Sigma}$	总损耗(磁心和铜), W
$\lambda$	密度, g/cm <sup>3</sup>	$P_t$	总视在功率, VA
$l_g$	气隙, cm	$P_{tin}$	自耦变压器输入功率, VA
$l_m$	磁材料部分路径长度, cm	$P_{to}$	自耦变压器输出功率, VA
$l_t$	磁路路径总长度, cm	$P_{VA}$	一次伏-安(一次侧视在功

	率)，VA	$U$	乘数因子
$R$	电阻， $\Omega$	VA	伏—安
$R_{AC}$	交流电阻(AC电阻)， $\Omega$	$V_{AC}$	外施电压，V
$R_{Cu}$	铜的电阻， $\Omega$	$V_c$	控制电压，V
$R_{DC}$	直流(DC)电阻， $\Omega$	$V_{c(pk)}$	电压峰值，V
$R_e$	体现磁心损失的等效电阻(与电感并联)， $\Omega$	$V_d$	二极管电压降，V
$R_g$	气隙的磁阻，1/H	$V_{in}$	输入电压，V
$R_L$	负载电阻， $\Omega$	$V_{in(max)}$	最大输入电压，V
$R_m$	磁心磁阻，1/H	$V_{in(min)}$	最小输入电压，V
$R_{mt}$	总磁阻，1/H	$V_n$	新电压，V
$R_o$	负载电阻， $\Omega$	$V_o$	输出电压，V
$R_{o(R)}$	反射的负载电阻， $\Omega$	$V_p$	一次电压，V
$R_{in(equiv)}$	反射的负载电阻， $\Omega$	$V_{p(rms)}$	一次 rms(方均根)电压，V
$R_p$	一次侧绕组电阻， $\Omega$	$V_{s(LL)}$	二次线电压，V
$R_R$	交流/直流电阻比(AC/DC电阻比)	$V_{s(LN)}$	二次相线到中性线的电压，V
$R_s$	二次侧绕组电阻， $\Omega$	$V_{r(pk)}$	纹波电压峰值，V
$R_t$	总电阻， $\Omega$	$V_s$	二次电压，V
$\rho$	电阻率， $\Omega\text{-cm}$	$\Delta V_{CC}$	电容器电压，V
$S_1$	导体面积/导线面积	$\Delta V_{CR}$	电容器的串联电阻的电压，V
$S_2$	已绕制导线的面积/可利用的窗口面积	$\Delta V_p$	一次电压变化量，V
$S_3$	可利用的窗口面积/窗口面积	$\Delta V_s$	二次电压变化量，V
$S_4$	可利用的窗口面积/可利用的窗口面积+绝缘面积	W	瓦特(Watts)
$S_{np}$	一次导线股数	W/kg	瓦/千克
$S_{ns}$	二次导线股数	$W_a$	窗口面积， $\text{cm}^2$
$S_{VA}$	二次侧伏—安(二次侧视在功率)	$W_{ac}$	控制窗口面积， $\text{cm}^2$
$\overline{SR}$	饱和电抗器	$W_{ag}$	选通窗口面积， $\text{cm}^2$
$T$	总周期，s	$W_{ap}$	一次窗口面积， $\text{cm}^2$
$t_{off}$	截止时间，s	$W_{as}$	二次窗口面积， $\text{cm}^2$
$t_{on}$	导通时间，s	$W_{a(eff)}$	有效窗口面积， $\text{cm}^2$
$t_r$	时间常数，s	W-s	瓦·秒
$t_w$	休止时间，s	$W_t$	质量，g
$T_r$	温升， $^{\circ}\text{C}$	$W_{tCu}$	铜质量，g
		$W_{tFe}$	铁(磁)心质量，g
		WK	W/kg, W-s W/s
		$X_L$	电感电抗， $\Omega$



# 目 录

CONTENTS

译者的话

序

前言

感谢

关于作者

符号

第1章 磁学基础.....	1
第2章 磁性材料及其特性 .....	23
第3章 磁心 .....	65
第4章 窗口的利用、励磁导线和绝缘.....	113
第5章 变压器的设计折中.....	149
第6章 变压器—电感器的效率、调整率和温升.....	165
第7章 功率变压器设计.....	175
第8章 用开气隙的磁心设计直流(DC)电感器 .....	199
第9章 采用粉末磁心的直流(DC)电感器设计 .....	221
第10章 交流(AC)电感器的设计.....	237
第11章 恒压变压器(CVT) .....	249
第12章 三相变压器设计 .....	265
第13章 反激变换器及其变压器设计 .....	281
第14章 正激变换器及其变压器和输出电感器设计 .....	319
第15章 输入滤波器设计 .....	341
第16章 电流变压器设计 .....	355
第17章 绕组电容和漏感 .....	367
第18章 静音变换器设计 .....	379
第19章 旋转式变压器设计 .....	401
第20章 平面变压器 .....	411
第21章 设计公式的推导 .....	429

第 22 章	自耦变压器设计 .....	441
第 23 章	共模电感器设计 .....	463
第 24 章	串联饱和电抗器设计 .....	481
第 25 章	自饱和磁放大器 .....	507
第 26 章	给定阻值电感器设计 .....	531
索引	.....	549

## 第1章

# 磁 学 基 础

Chapter 1

学习更多电源知识请关注微信公众号：电源研发精英圈  
或搜索微信号：“dianyuankaifa”关注

# 目 次

导言 .....	3
真空中的磁特性 .....	3
磁场的增强 .....	4
简单变压器 .....	5
磁心 .....	6
磁心的基本特性 .....	7
磁滞回线 ( $B-H$ 回线) .....	8
磁导率 .....	9
磁动势 ( $mmf$ ) 和磁场强度 ( $H$ ) .....	11
磁阻 .....	12
空气隙 .....	13
用空气隙控制直流 (DC) 磁通 .....	15
空气隙的类型 .....	16
边缘磁通 .....	17
材料的磁导率 ( $\mu_m$ ) .....	17
空气隙 .....	18
边缘磁通 .....	18
开气隙直流电感器的设计 .....	19
边缘磁通与线圈的邻近度 .....	20
边缘磁通的聚集 .....	21
边缘磁通与粉末磁心 .....	22

## 导 言

在掌握磁学领域的过程中会遇到很大的困难，因为它可能用许多不同的单位制——厘米—克—秒 (cgs) 制、米—千克—秒 (mks) 制和混合英制。磁学可以通过利用 cgs 制以简单的方法来处理。但是，任何规律似乎都有例外，如磁导率。

## 真空中的磁特性

一根载有直流电流  $I$  的长直导线在导线周围产生一圆形磁场，磁场强度  $H$  和磁感应强度  $B$  如图 1-1 所示。其关系是：

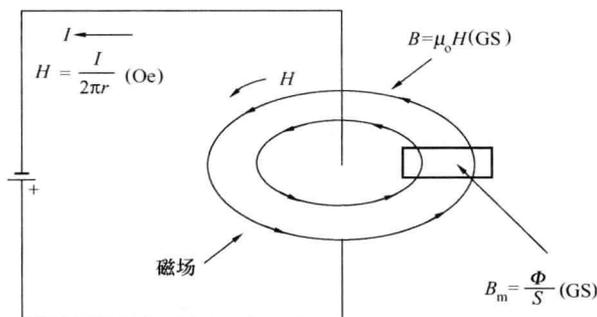


图 1-1 载流导体产生的磁场

一直导线周围磁通线的方向可用“右手定则”来决定：当用右手抓住导体，拇指的指向是电流流动的方向时，其他手指的指向就是磁通线的方向。这个电流方向是指惯常规定的电流方向，而不是电子流动的方向。

当电流以某一方向流过导线时，如图 1-2 (a) 所示，罗盘的指针将指向一个方向。当导线中的电流方向相反时，如图 1-2 (b) 所示，罗盘的指针也将反向。这表示磁场

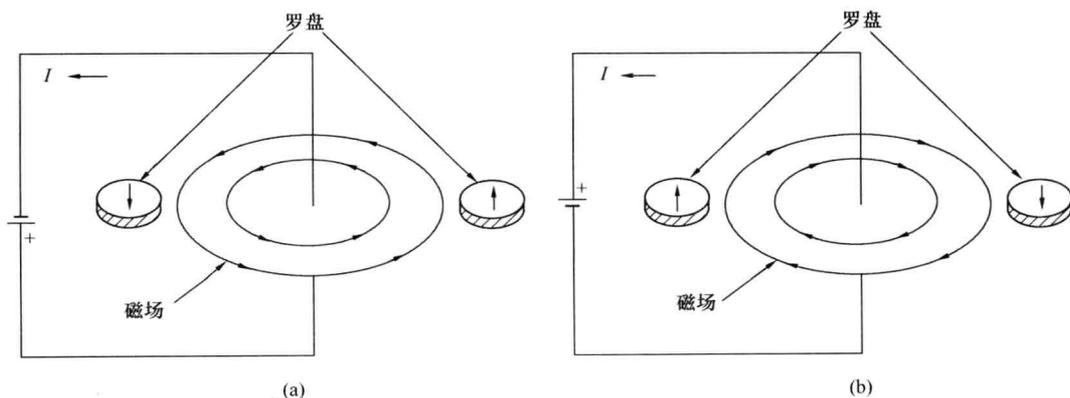


图 1-2 罗盘表明磁场怎样改变极性

学习更多电源知识请关注微信公众号：电源研发精英圈  
或搜索微信号：“dianyuankaifa”关注

具有极性, 即当电流  $I$  反向时, 磁场强度  $H$  将随着电流反向。

## 磁场的增强

当电流流过一个导线时, 在其周围建立起磁场。如果如图 1-3 所示, 载有相同方向电流的导体离开相当大的距离, 则产生的磁场没有相互的影响。如果同样的两个导体被放置得很靠近, 如图 1-4 所示, 则磁场将加强, 其强度加倍。

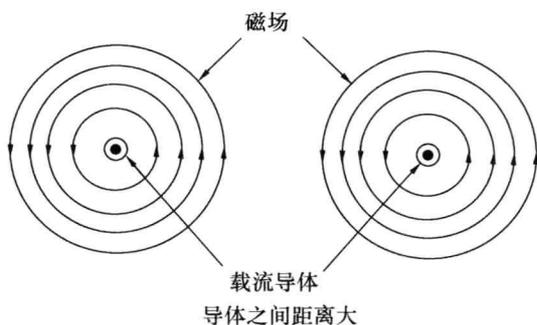


图 1-3 被分开的导体周围产生的磁场

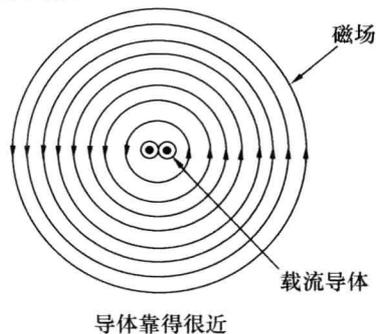


图 1-4 在靠紧的导体周围产生的磁场

$$\gamma = \frac{B^2}{8\pi\mu} [\text{能量密度}] \quad (1-1)$$

如果把导线绕在一个骨架上, 其磁场会被大大增强。实际上, 线圈所表现出的磁场很像一个磁棒的磁场, 如图 1-5 所示。像磁棒一样, 线圈具有一个北极和一个中心区域。并且其极性可以通过使线圈中的电流  $I$  反向而反向。这再一次证明了磁场的方向取决于电流的方向。

磁路是围绕线圈“流通”磁通的空间, 磁通的大小由线圈中的电流  $I$  和线圈的匝数  $N$  决定。为产生磁通而需要的“力”  $NI$ , 就是磁动势 ( $mmf$ )。对空心线圈而言, 磁通密度  $B$  与磁场强度  $H$  之间的关系如图 1-6 所示,  $B$  对  $H$  的比值被称为磁导率  $\mu$ , 对于空心线圈而

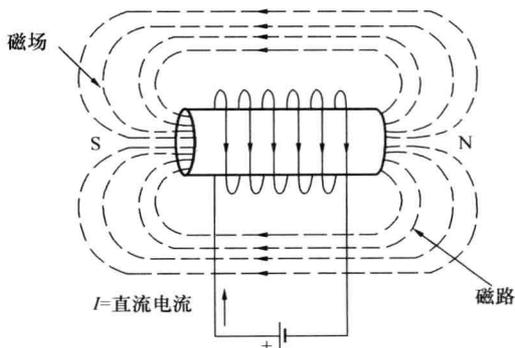


图 1-5 直流激励的空心线圈

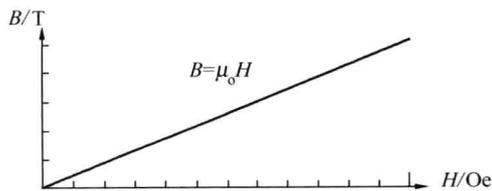


图 1-6 直流激励下  $B$  与  $H$  的关系

① 译者注: 这是一个非合理化 CGSM 电磁单位制下的磁场能量密度表达式。式中  $\gamma$  为磁场的能量密度, 单位是  $\text{erg}/\text{cm}^3$ , 即尔格/厘米<sup>3</sup>;  $B$  是磁感应强度或磁通密度, 单位是 Gs, 即高斯;  $\mu$  是介质的磁导率, 无量纲。在这种单位制的情况下, 真空中的磁导率  $\mu_0 = 1$ , 也是无量纲。另外, 此公式出现在这里, 与上下文关系不明显。

言，在（非合理化）cgs 单位制中，这个比值是 1，其单位是高斯每奥斯特（Gs/Oe）。

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 1 \\ B &= \mu_0 H \end{aligned} \quad (1-2)$$

如果图 1-5 中的电池用一个交流电源代替，如图 1-7 所示， $B$  与  $H$  之间的关系将有如图 1-8 所示的特性。 $B$  与  $H$  之间的关系为线性关系是空心线圈的主要优点。因为关系是线性的，所以当  $H$  增加时， $B$  将增加，因此线圈中的磁通也以同样的方式增加，所以用大的电流可以产生大的磁场。对此有一个明显的限制，即它取决于导线中允许的最大电流及其导致的温升。

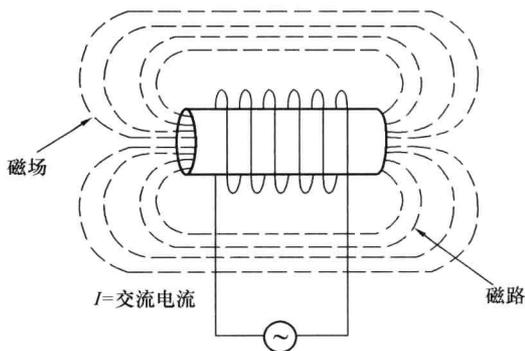


图 1-7 交流电源励磁下的空心线圈

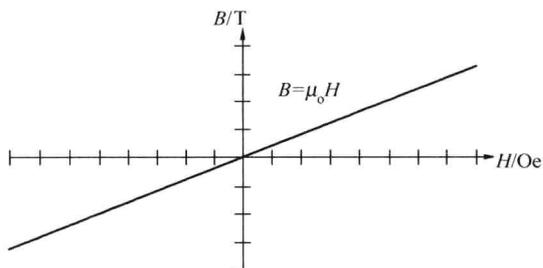


图 1-8 交流励磁下  $B$  与  $H$  之间的关系

对于室内环境温度以上  $40^{\circ}\text{C}$  的温升而言，大约  $0.1\text{T}$  的磁场是合适的。具有被特别冷却的线圈，可以获得  $10\text{T}$  的磁场。

## 简单变压器

图 1-9 示出一个最简形式的变压器。这个变压器有两个穿过共同磁通的空心线圈。

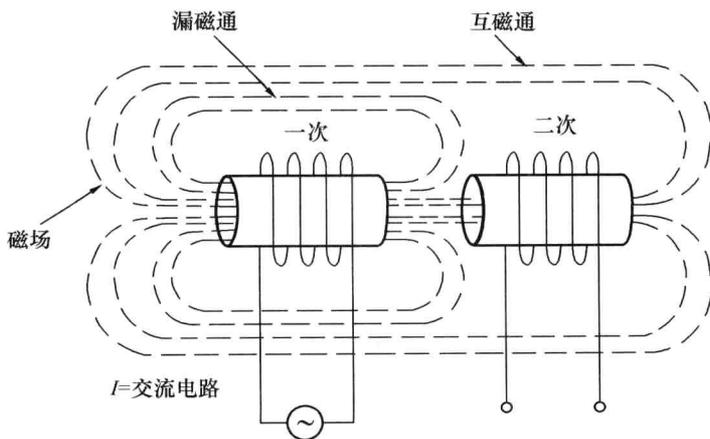


图 1-9 最简单的变压器类型

磁通以各个方向从一次线圈散发出来，它未被集中或限制。一次线圈被连到电源上，载有电流，这个电流建立磁场。另一个线圈被开路。请注意进到两个线圈中的磁通线不是共同的。这两个磁通之差就是漏磁通，即漏磁通是不共同交链两个线圈的磁通部分。

## 磁 心

多数材料是磁通的不良导体，它们的磁导率都很低。真空的磁导率是1.0。非导磁材料，如空气、纸和铜，具有同样数量级的磁导率。有一些材料，如铁、镍、钴和它们的合金具有高的磁导率，往往达到几百或几千。为了使如图1-10所示的空心线圈磁通能得到改善，可以引入一个磁心，如图1-11所示。在空心线圈中放入一个磁心的优点

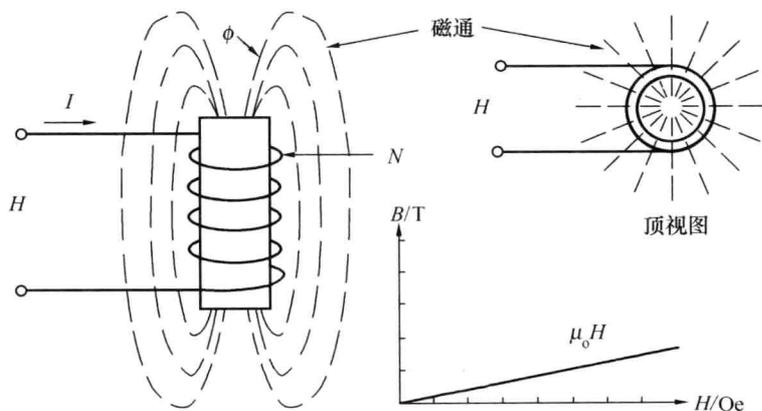


图 1-10 当被激励时，“发射”磁通的空心线圈

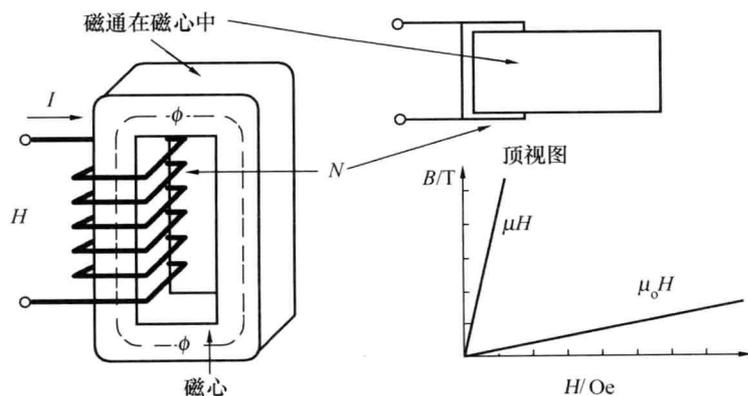


图 1-11 磁心的引入

除了其磁导率高以外，是其磁路长度（MPL—magnetic path length）明确了。除了最靠近线圈的地方，磁通基本上被限制在磁心中。在磁心进入饱和，线圈又恢复到空心状态之前，磁性材料中能够产生多少磁通是有一个界限点的，如图 1-12 所示。

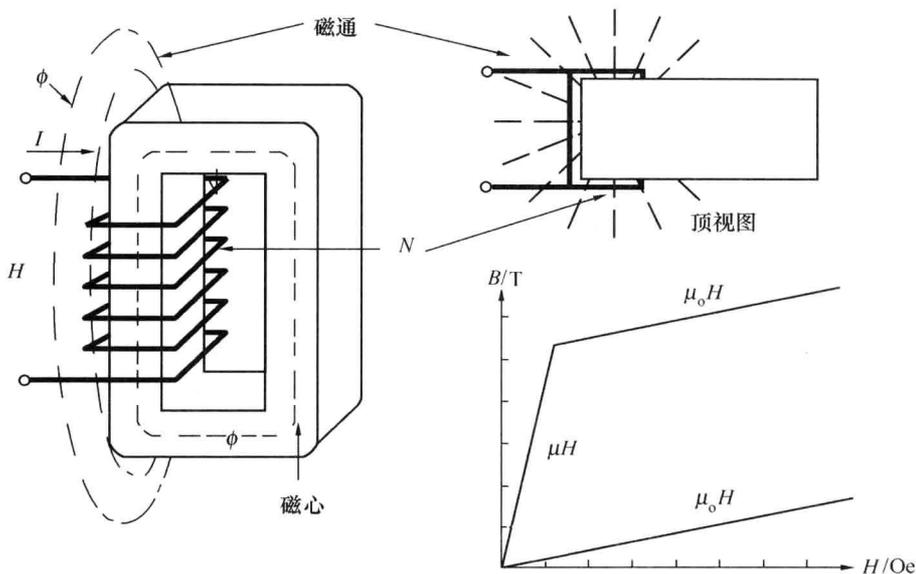


图 1-12 被驱动进入饱和的磁心

### 磁心的基本特性

对一个被完全退了磁的铁磁材料，用一个外施的磁化力（即磁场强度） $H$  激励，并且使磁场强度  $H$  慢慢地从零增加，其结果如图 1-13 所示。图中磁通密度  $B$  是作为磁场强度  $H$  的函数被画出。请注意，开始的时候磁通密度很慢地增加到  $A$  点，然后，很快增加到  $B$  点，再然后，几乎停止了增加。 $B$  点被称为曲线的拐点。在  $C$  点，磁心材料已经饱和。从这个点以后曲线的斜率为

$$\frac{B}{H} = 1 \quad (\text{Gs/Oe}) \quad (1-3)$$

此时，线圈的表现好像空心的一样。当磁心处于深度饱和时，线圈具有像空气一样的磁导率，即 1。在图 1-14、图 1-15 到图 1-16 的顺序中，按照磁化曲线（的运行位置）示出了磁心中磁通是怎样从磁心的内侧向磁心的外侧，直到磁心饱和。

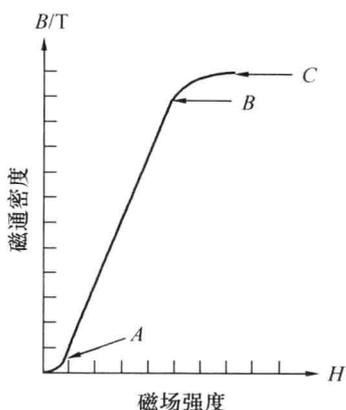


图 1-13 典型的磁化曲线

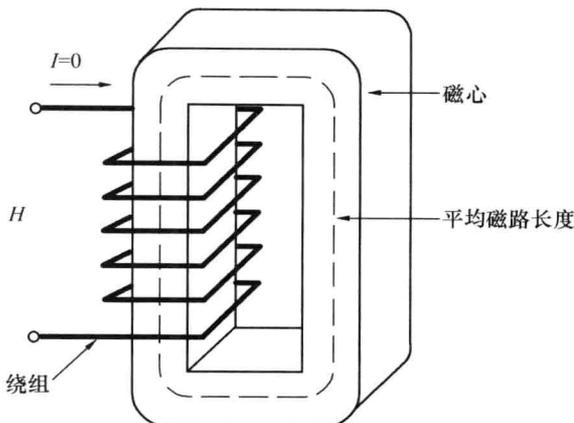


图 1-14 零激励时的磁心

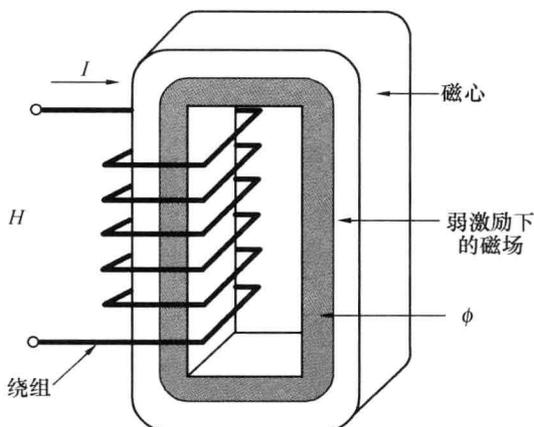


图 1-15 弱激励时的磁心

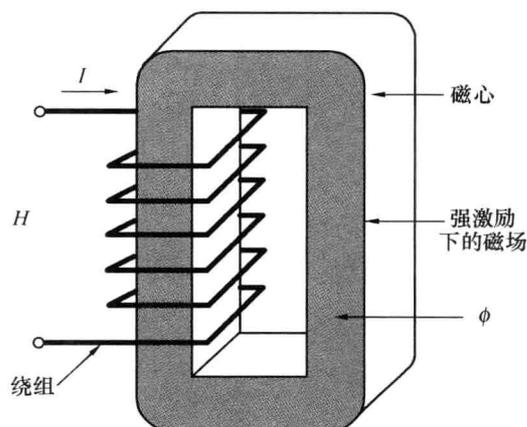


图 1-16 强激励时的磁心

## 磁滞回线 (B-H 回线)

工程师可以通过认真地观察磁滞回线得到对磁性材料的初步估价。当磁性材料进行了一个磁化和去磁的完整周期后，其结果如图 1-17 所示。这个图从一个中性的磁性材料，即其 B-H 回线通过原点 X 开始。当 H 增加时，磁通密度 B 沿着虚线增加到饱和点  $B_s$ 。这时，当 H 减少时，B-H 回线将沿一个较高水平的路径被画到  $B_r$ ，此处 H 为零且磁心仍处于被磁化状态。这一点的磁通被称为剩余磁通，这一点具有的磁通密度为  $B_r$ 。

现在，把磁场强度 H 的极性反过来以给出其负值，使磁通密度  $B_r$  减少到零所需要的磁场强度被称为矫顽力  $H_c$ 。当磁心（再次）被驱动进入饱和时，剩磁  $B_{rs}$  就是（再次）饱和以后的剩余磁通，矫顽力  $H_{cs}$  就是使 B 恢复到零所需要的磁场强度。沿着图 1-17

中以  $X$  为起点的初始磁化曲线， $B$  从零点随着  $H$  增加，直到材料饱和。实际上，在被励磁过的变压器中，磁心的磁化从来不会沿着这条曲线，因为磁心根本不会像第一次被励磁那样处在完全的退磁状态。

磁滞回线表征了磁心中的能量损失。测量磁滞回线的最好方法是用直流电流，因为磁场强度必须慢慢地变化以便不使其在材料中产生涡流。只有在这种条件下，闭合  $B-H$  回线的内部面积显示的才是磁滞的作用，所合围的面积是磁心材料在一个周期中能量损失的量度。在交流应用的情况下，这个过程不断地重复即总的磁滞损失取决于频率。

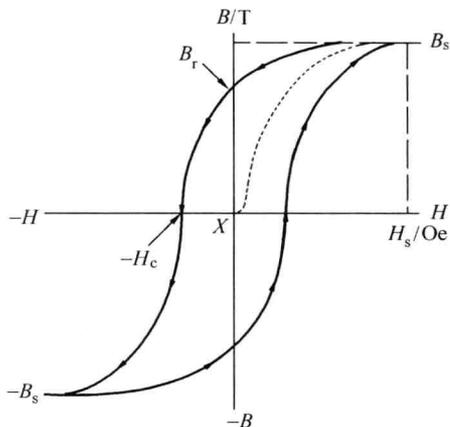


图 1-17 典型的磁滞回线

## 磁 导 率

在磁学中，磁导率代表材料导通磁通的能力。在给定磁感应强度的情况下，磁导率的大小是磁心材料能够被磁化到这个磁感应强度难易程度的量度。它的定义是磁通密度  $B$  对磁场强度  $H$  的比值，制造厂商给出的磁导率单位是高斯每奥斯特。

$$\text{磁导率} = \frac{B}{H} \quad \left( \frac{\text{Gs}}{\text{Oe}} \right) \quad (1-4)$$

在 cgs 单位制中真空的绝对磁导率  $\mu_0$  是 1 (Gs/Oe)，即

$$\text{cgs: } \mu_0 = 1, \quad \frac{\text{Gs}}{\text{Oe}} = \frac{\text{T}}{\text{Oe}} \times 10^4$$

$$\text{MKS: } \mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-8} \quad \left( \frac{\text{H}}{\text{m}} \right) \quad (1-5)$$

当如图 1-18 所示相对于  $H$  点画  $B$  时，所得到的曲线被称为磁化曲线。这些曲线是

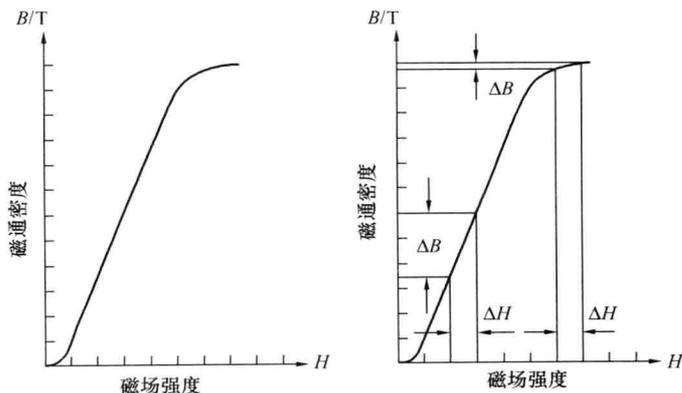


图 1-18 磁化曲线

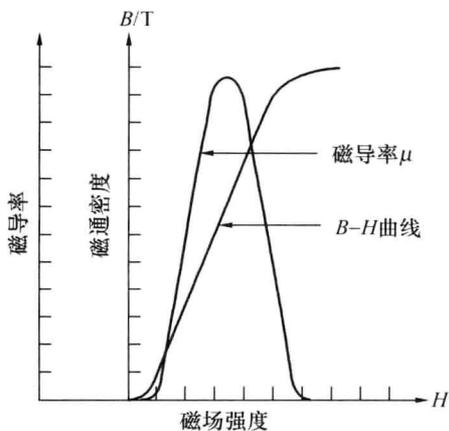


图 1-19 磁导率  $\mu$  沿磁化曲线的变化

理想化的，磁性材料被完全退磁，然后，逐渐增加磁场强度来画磁通密度。在任何给定曲线上的斜率给出了该点的磁导率。对于典型的  $B-H$  曲线可以画出其磁导率曲线，如图 1-19 所示。由于磁导率不是常数，因此，它的值只能针对给定的  $B$  或  $H$  来描述。

现在有许多不同的磁导率，它们每一个都用符号  $\mu$  的不同下标来指明。

$\mu_0$ ：绝对磁导率，用真空中磁导率来定义。

$\mu_i$ ：初始磁导率，是初始磁化曲线在原点的斜率。它是在很小的磁感应强度范围内测量的，如图 1-20 所示。

$\mu_\Delta$ ：增量磁导率，是具有附加直流磁化情况下，一定磁通密度的峰—峰值相对应磁化曲线的斜率，如图 1-21 所示。

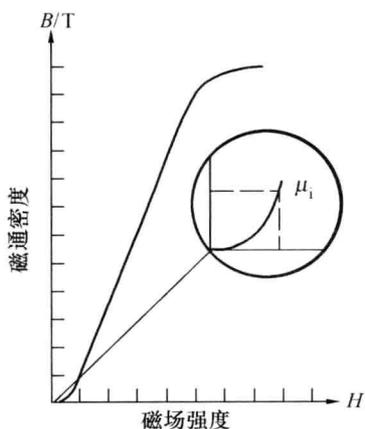


图 1-20 初始磁导率

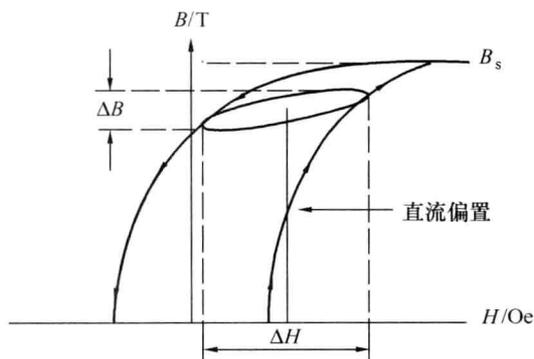


图 1-21 增量磁导率

$\mu_e$ ：有效磁导率。如果磁路不是单一材料的（也就是包括空气隙），则有效磁导率就是一个假想的由单一材料（无气隙）构成磁路的磁导率。这个磁路与上述含气隙磁路具有相同形状、尺寸且能给出与含气隙磁路给出的相同电感量。

$\mu_r$ ：相对磁导率，是材料的磁导率相对于真空磁导率的比值。

$\mu_n$ ：正常磁导率，是如图 1-22 所示曲线任意点的比值，即  $B/H$ 。

$\mu_{max}$ ：最大磁导率，是从原点画与其拐点附近曲线相切的直线斜率，如图 1-23 所示。

$\mu_p$ ：脉冲磁导率，是对于单向激励下，峰值  $B$  对峰值  $H$  的比值。

$\mu_m$ ：材料磁导率，是在小于 50Gs 情况下测得的磁化曲线的斜率，如图 1-24 所示。

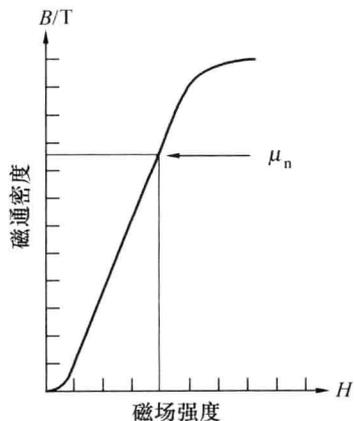


图 1-22 正常磁导率

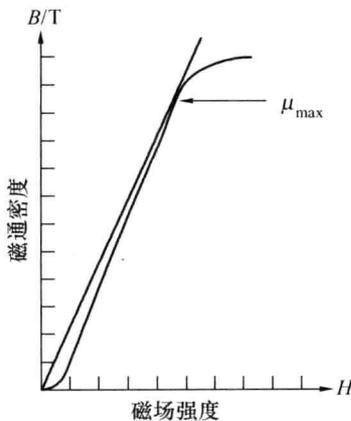


图 1-23 最大磁导率

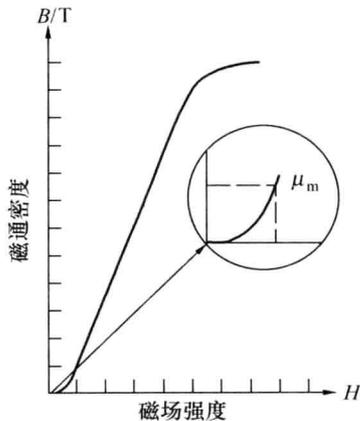


图 1-24 材料磁导率

## 磁动势 (mmf) 和磁场强度 (H)

在磁学中通常会碰到两个“力”的作用：磁动势  $mmf$  和磁场强度  $H$ 。磁动势不应与磁场强度相混淆，它们是因果关系。磁动势由下面公式给出

$$mmf = 0.4\pi NI \text{ (gilberts, 即吉伯)} \quad (1-6)$$

式中： $N$  是线圈的匝数； $I$  是电流，A（安培）； $mmf$  是磁动势； $H$  是磁场强度，即每单位长度的磁动势。

$$H = \frac{mmf}{MPL} \left( \frac{\text{gilberts}}{\text{cm}} = \text{Oe} \right) \quad (1-7)$$

经代入

$$H = \frac{0.4\pi NI}{MPL} \text{ (Oe)} \quad (1-8)$$

式中： $MPL$  为磁路长度，cm。

如果把磁通除以磁心面积  $A_c$ ，我们就得到了磁通密度  $B$ ，单位是每单位面积的磁力线根数<sup>❶</sup>

$$B = \frac{\Phi}{A_c} \text{ (Gs)} \quad (1-9)$$

在磁介质中由于磁场强度  $H$  的存在，磁通密度  $B$  决定介质的磁导率和磁场的强度

$$B = \mu H \text{ (Gs)} \quad (1-10)$$

对于绕制的磁心，磁化电流峰值  $I_m$  可由下面的公式计算

❶ 磁通线根数是较老的概念，规定 1 根磁力线代表 1 麦克斯韦尔。

$$I_m = \frac{H_o (MPL)}{0.4\pi N} \quad (A) \quad (1-11)$$

式中： $H_o$  为工作点峰值处的磁场强度。为了求出磁场强度  $H_o$ ，我们利用制造厂商提供的在适当频率下体现磁心损失的特性曲线和工作磁通密度  $B_o$ ，如图 1-25 所示。

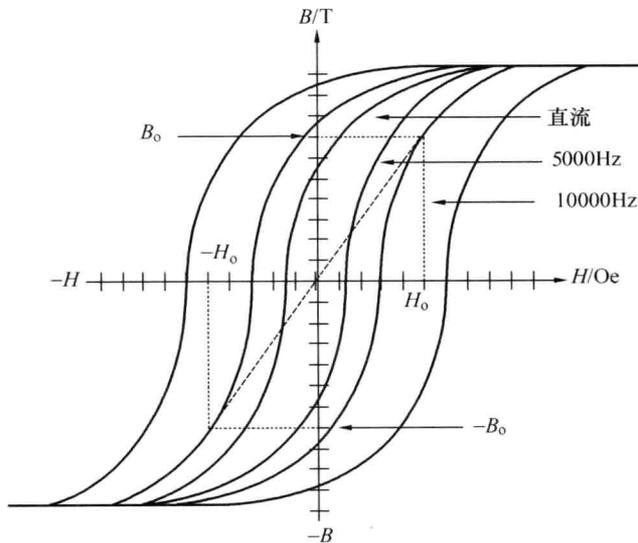


图 1-25 工作在不同频率下的典型 B-H 回线

## 磁 阻

由磁动势 (*mmf*) 在给定的材料<sup>❶</sup>中产生的磁通取决于材料<sup>❶</sup>对磁通的阻力。这个阻力被称作磁阻  $R_m$ 。磁心的磁阻取决于其材料和其物理尺寸的合成。它与电阻的概念相类似。磁动势 (*mmf*)、磁通和磁阻的关系与电动势 (*emf*)、电流和电阻的关系相类似，磁阻与电阻的比较如图 1-26 所示。

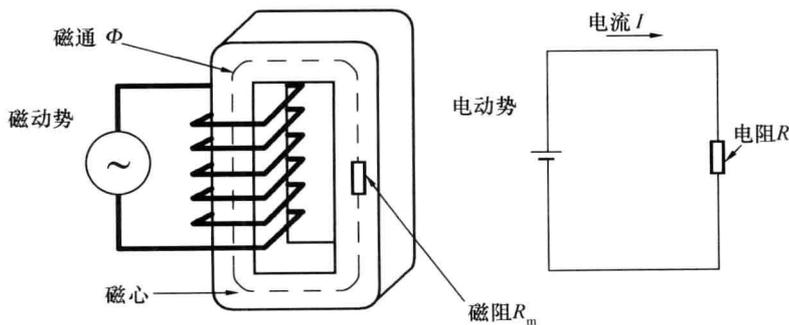


图 1-26 磁阻与电阻的比较

❶ 原文如此 (即 material)，实际应为磁心。

$$\begin{aligned} emf(E) &= IR = \text{电流} \times \text{电阻} \\ mmf(F_m) &= \Phi R_m = \text{磁通} \times \text{磁阻} \end{aligned} \quad (1-12)$$

一个磁通的不良导体具有高的磁阻  $R_m$ ，磁阻越高，获得给定磁场（磁感应强度）所需要的磁动势越高。

导体的电阻与它的长度  $l$ 、横截面积  $A_w$  和其特定的电阻率  $\rho$  有关， $\rho$  即为单位长度的电阻<sup>❶</sup>。欲求任何尺寸或长度的铜导线电阻，我们只要把电阻率乘以其长度再除以其横截面积即可。

$$R = \frac{\rho l}{A_w} \quad (\Omega) \quad (1-13)$$

对于磁路， $1/\mu$  相当于  $\rho$ ，称为磁阻率。磁路的磁阻由下式给出

$$R_m = \frac{MPL}{\mu_r \mu_0 A_c} \quad (1-14)$$

式中： $MPL$  为磁路长度，单位是  $\text{cm}$ ； $A_c$  为磁心的横截面积，单位是  $\text{cm}^2$ ； $\mu_r$  为磁性材料的相对磁导率； $\mu_0$  为空气的磁导率。

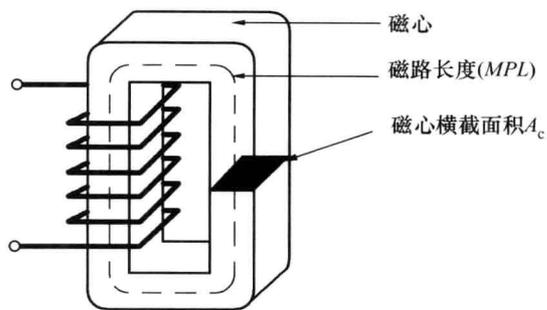


图 1-27 说明磁路长度 (MPL) 和横截面积  $A_c$  的磁心

用来说明磁路长度  $MPL$  和横截面积  $A_c$  的典型 C 形磁心如图 1-27 所示。

## 空气隙

在磁路长度 ( $MPL$ ) 和磁心横截面积  $A_c$  给定的情况下，高磁导率材料构成的磁心具有低的磁阻。如果在磁路中包含空气隙，典型的含有空气隙磁心如图 1-28 所示，它的磁阻与由像铁那样低磁阻率材料构成的磁心磁阻就不一样了，这个路径的磁阻几乎将全部在空气隙中，因为空气隙的磁阻率比磁性材料的磁阻率大得多。在所有的实用场合，我们都是通过控制空气隙的大小来控制磁阻的。

一个例子可以最好地显示这个控制方法。磁心的总磁阻等于铁的磁阻和空气隙的磁阻之和，这与电路中两个串联电阻相加是一样的。计算空气隙磁阻  $R_g$  的公式与计算磁性材料磁阻  $R_m$  的公式基本相同。其不同是空气的磁导率是 1 及要用气隙长度  $l_g$  来代替磁路长度 ( $MPL$ )。其公式为

$$R_g = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{l_g}{A_c} \quad (1-15)$$

因为  $\mu_0=1$ ，则式 (1-15) 可简化为

❶ 这里的  $\rho$  为单位长度的电阻可理解为：①它的量纲是电阻的量纲/长度的量纲；②单位面积情况下的单位长度的电阻。

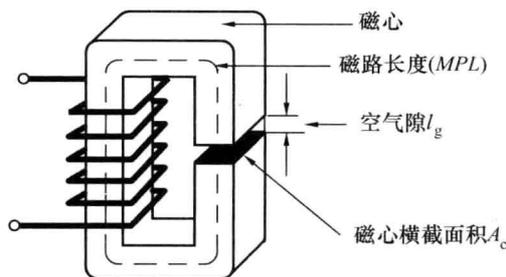


图 1-28 典型的含有空气隙磁心

式中： $\mu_r$  是相对磁导率，它只能与具体的磁性材料一起使用。

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B}{\mu_0 H} \quad \left( \frac{\text{Gs}}{\text{Oe}} \right)^{\text{①}} \quad (1-18)$$

磁性材料的磁导率  $\mu_m$  由下式给出

$$\mu_m = \mu_r \mu_0 \quad (1-19)$$

气隙的磁阻甚至在气隙很小的情况下也比铁部分的磁阻大。其原因是磁性材料具有的磁导率相当高，见表 1-1。所以，磁路的总磁阻更多地取决于气隙。

表 1-1 材料的磁导率  $\mu_m$

材料名称	磁导率
铁合金	0.8k~25k
铁氧体	0.8k~20k
非晶态	0.8k~80k

在计算了总磁阻以后，就可以计算等效磁导率  $\mu_e$  了。

$$R_{mt} = \frac{l_t}{\mu_e A_c} \quad (1-20)$$

$$l_t = l_g + MPL$$

式中： $l_t$  是总的磁通路径长度； $\mu_e$  是等效磁导率。

$$R_{mt} = \frac{l_t}{\mu_e A_c} = \frac{l_g}{\mu_0 A_c} + \frac{MPL}{\mu_0 \mu_r A_c} \quad (1-21)$$

化简可得

$$\frac{l_t}{\mu_e} = \frac{l_g}{\mu_0} + \frac{MPL}{\mu_0 \mu_r} \quad (1-22)$$

因此

$$\mu_e = \frac{l_t}{\frac{l_g}{\mu_0} + \frac{MPL}{\mu_0 \mu_r}} \quad (1-23)$$

$$\mu_e = \frac{l_g + MPL}{\frac{l_g}{\mu_0} + \frac{MPL}{\mu_0 \mu_r}}$$

① 这里  $\mu_r$  给出一个单位 (Gs/Oe)，似不妥。因为  $\mu = \mu_r \mu_0$ ，而  $\mu_0 = 1$ ，其单位已给出是 (Gs/Oe)，而  $\mu$  的单位也是 (Gs/Oe)，则  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$  就应是无量纲的纯数。

若  $l_g \ll MPL$ , 用  $(\mu_r \mu_0) / (MPL)$  乘以公式分式的上下两边, 为

$$\mu_e = \frac{\mu_0 \mu_r}{1 + \mu_r \left( \frac{l_g}{MPL} \right)} \quad (1-24)$$

典型的公式是

$$\mu_e = \frac{\mu_m}{1 + \mu_m \left( \frac{l_g}{MPL} \right)} \quad (1-25)$$

把空气隙  $l_g$  引入磁心虽然不能对磁通的直流成分进行(完全的)修正, 但是它能使磁通的直流成分基本维持不变。当气隙增加时其磁阻也增加。在磁动势一定的情况下, 气隙可以控制磁通密度。

### 用空气隙控制直流 (DC) 磁通

存在两个类似的计算直流 (DC) 磁通的公式。第一个公式用于粉末磁心。粉末磁心是由磁性材料的精细颗粒制成, 这种粉末都涂上惰性的绝缘材料以使涡流最小化, 在磁心结构中引入了分布的空气隙

$$\begin{aligned} \mu_r &= \mu_e \\ B_{dc} &= \mu_r \frac{0.4\pi NI}{MPL} \quad (\text{Gs}) \\ \mu_r &= \frac{\mu_m}{1 + \mu_m \frac{l_g}{MPL}} \end{aligned} \quad (1-26)$$

第二个公式是用于当设计需要用设置一个气隙与磁路长度 ( $MPL$ ) 相串联的时候, 诸如经切割的铁氧体磁心, E 形磁心或平接叠片的磁心。

$$B_{DC} = \mu_r \left( \frac{0.4\pi NI}{MPL} \right) \quad (\text{Gs}) \quad (1-27)$$

用  $(MPL\mu_m) / MPL\mu_m$  代替 1

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{1 + \mu_m \frac{l_g}{MPL}} = \frac{\mu_m}{\frac{MPL\mu_m}{MPL\mu_m} + \mu_m \frac{l_g}{MPL}} \quad (1-28)$$

然后, 化简为

$$\mu_r = \frac{MPL}{\frac{MPL}{\mu_m} + l_g} \quad (1-29)$$

$$B_{DC} = \frac{MPL}{\frac{MPL}{\mu_m} + l_g} \left( \frac{0.4\pi NI}{MPL} \right) \quad (\text{Gs}) \quad (1-30) \textcircled{1}$$

**①** 本节开头说的“存在两个类似的计算直流磁通公式”, 第一个公式就是对于粉末磁心的式 (1-26), 第 2 个公式就是对于含气隙的高磁导率材料组成磁心的式 (1-30)。译者认为式 (1-26)、式 (1-27)、式 (1-28)、式 (1-29) 中的  $\mu_r$  改为  $\mu_e$  更合适。

然后，化简为

$$B_{DC} = \frac{0.4\pi NI}{l_g + \frac{MPL}{\mu_m}} \quad (\text{Gs}) \quad (1-31)$$

## 空气隙的类型

在磁器件的设计中所用的气隙基本上有两种类型：块状的和分散的。块状气隙由诸如纸、聚酯薄膜甚至玻璃的材料固定。嵌入的缝隙材料与磁路相串联以增加磁阻，如图

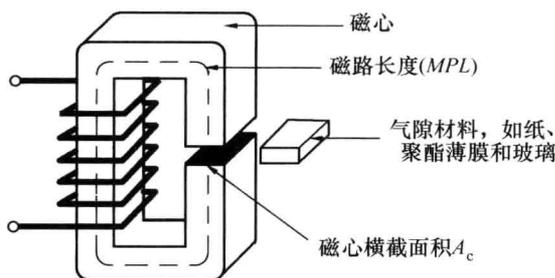


图 1-29 气隙材料的放置

1-29 所示。

气隙填充材料的放置对于保持磁心在结构上的平衡是很关键的。如果气隙在每个柱中不均衡，磁心将变得不平衡，并且会比要求的气隙要大。有很多设计者认为，气隙放置的地方能使由气隙处边缘磁通引起的噪声最小化是很重要的。图 1-30 示出了不同磁心结构中气隙的位置安排。

图 1-30 (a)、(c) 和 (d) 是一般的气隙安排。图 1-30 (b) 所示的 EE 或 EC 形磁心是最好的，其气隙是在磁组件里边被分开的。这样可使边缘磁通噪声最小化。当采用图 1-30 (a)、(c) 和 (d) 中的气隙安排时，每个磁心柱中只是计算出气隙厚度的一半。

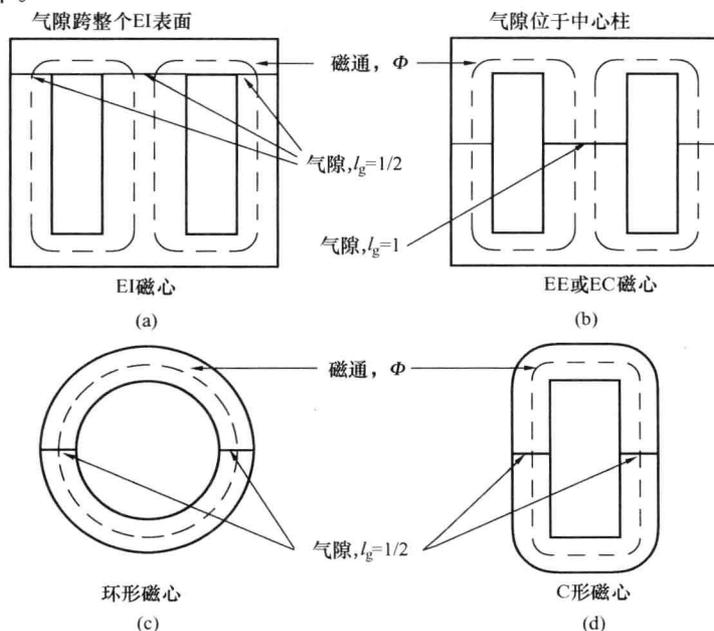


图 1-30 不同磁心结构采用的气隙位置安排

## 边缘磁通

### 引言

对于功率变换工程师而言，从一开始就被边缘磁通问题困扰着。进行功率变换时使边缘磁通最小化的磁学设计总是一个难题。工程师们已经学过了围绕边缘磁通设计以及如何使其影响最小化，但是实际情况似乎是：工程师们真的发现问题时，常常是设计已经完成并准备离开的时候。这就是工程师会察觉到以前没有认识到的某些事情。这样的事情（一般）在最后的试验中当某个单元变得不稳定、电感电流是非线性的<sup>①</sup>或在试验期间工程师刚好定位于热点的时候发生。边缘磁通能引起很多问题。边缘磁通能降低变换器的整体效率，这是由于产生涡流。这个涡流引起了线圈和（或）骨架局部发热。当设计电感器的時候必须要考虑边缘磁通。如果对边缘磁通处理不当，将会发生磁心的过早饱和。现在，越来越多的磁器件都被设计工作在亚兆赫范围。高频确实带来边缘磁通和由它产生的寄生涡流。在高频下运行，已经使工程师深切地认识到边缘磁通对设计的妨碍。

## 材料的磁导率 ( $\mu_m$ )

通常在产品目录中所看到的  $B-H$  回线都是由磁性材料的环形样品取得的。无气隙的环形磁心是考察给定材料  $B-H$  回线的理想样品。在环形样品中将看到它的最高磁导率  $\mu_m$ ，如图 1-31 所示。

小于  $25\mu\text{m}$  的小空气隙，由于  $B-H$  回线的“剪切”而产生巨大的影响。这个  $B-H$  回线的“剪切”降低了磁导率，切割型的高磁导率铁氧体，如 E 形磁心与同样材料的环形磁心相比，其磁导率仅约为其 80%，这是因为尽管其相配合的表面已经过高度抛光，还是引起了空气隙。一般讲，具有高磁导率的磁性材料对温度、压力、励磁电压和频率都很敏感。

电感的变化与磁导率的变化成正比。这个电感的变化将对励磁电流有影响。人们很容易理解，被设计用于 LC 调谐电路中的电感器应该有一个稳定的磁导率  $\mu_e$ 。

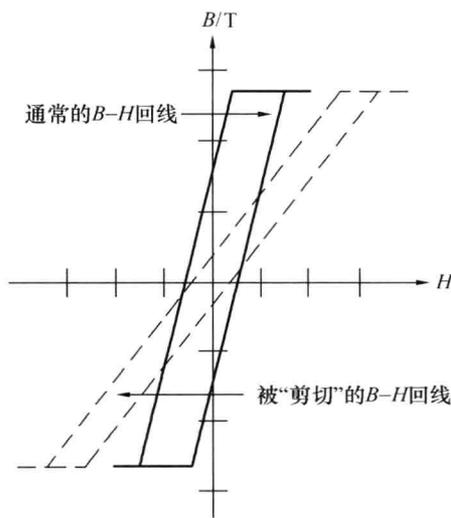


图 1-31 由于空气隙造成的理想  $B-H$  回线的“剪切”<sup>②</sup>

① 电感电流是一个电路变量，它无所谓线性与非线性。这里似指由于磁心的磁状态进入饱和，使电感电流产生了畸变。  
② 这里的“剪开”（Shearing）是指对有空气隙和无空气隙的磁心所测得两个  $B-H$  回线图呈张开的剪刀形状。

$$L = \frac{0.4\pi N^2 A_c \Delta\mu \times 10^{-8}}{MPL} \quad (\text{H}) \quad (1-32)^{\text{①}}$$

## 空气隙

把空气隙引入磁路中可有多种理由。在变压器中，设计一个嵌入磁路的小气隙  $l_g$ ，将获得减小和稳定的等效磁导率  $\mu_e$

$$\mu_e = \frac{\mu_m}{1 + \mu_m \frac{l_g}{MPL}} \quad (1-33)$$

这就导致了比较严格地抑制了磁导率随温度和励磁电压变化而变化。电感器的设计一般将要求较大的空气隙  $l_g$  以便控制直流 (DC) 磁通

$$l_g = \frac{0.4\pi N I_{\text{DC}} \times 10^{-4}}{B_{\text{DC}}} \quad (\text{cm}) \quad (1-34)$$

无论何时把空气隙嵌入磁路中，如图 1-32 所示。在气隙处总会产生边缘磁通。

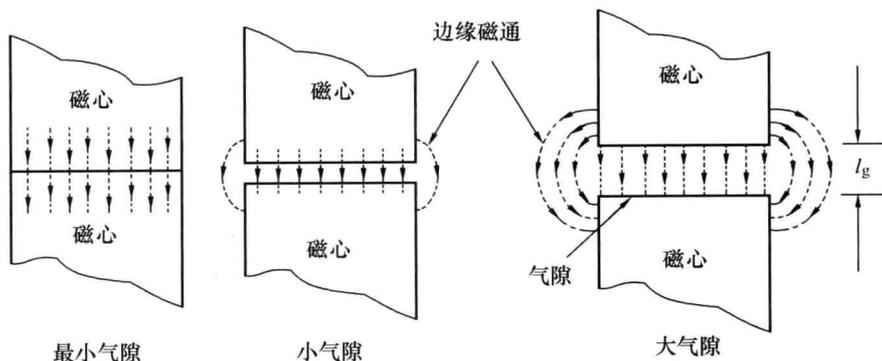


图 1-32 气隙处的边缘磁通

边缘磁通影响的大小是气隙尺寸、磁极表面的形状以及线圈的形状、尺寸和位置的函数。它的最终影响效果是缩短了空气隙。边缘磁通使磁路的总磁阻减小，因此，使其电感比计算值增加一个系数  $F$ 。

## 边缘磁通

边缘磁通完全分布在气隙的周围，并以高损失的方向重新进入磁心，如图 1-33 所

① 此式应作如下说明：①根据上文来看， $\Delta\mu$  应为  $\mu_e$ ；②  $MPL$  应为  $MPL + l_g$ ，但  $l_g \ll MPL$ ，这里用  $MPL$  代替；③式中  $A_c$  的单位为  $\text{cm}^2$ ， $MPL$  单位为  $\text{cm}$ 。

示。准确的预测计算由边缘磁通造成的气隙损耗  $P_g$  是很困难的。

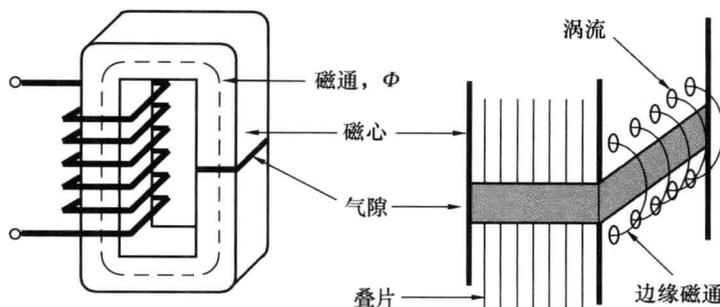


图 1-33 具有高损失涡流的边缘磁通

气隙周围的区域对金属物体（如夹紧、托架和箍紧材料）是很敏感的。其敏感的程度取决于磁动势的大小、气隙尺寸和工作频率。如果金属、托架或箍紧材料是被用来固定磁心并从气隙旁经过，可发生两种情况：①如果靠在气隙上或紧靠气隙的是铁磁材料，则它使磁场导通，这被称为“气隙短路”（shorting the gap）。短路气隙的作用与减小气隙尺寸是相同的，因此，产生出比设计要高的电感并可使磁心被驱动进入饱和；②如果材料虽是金属，但不是铁磁性的，如铜或磷青铜，它将不使气隙短路或改变电感。在这两种情况下，如果边缘磁通足够强，它将感应出涡流引起局部发热。这与感应加热中所利用的原理是相同的。

## 开气隙直流电感器的设计

边缘磁通系数  $F$  对电感器设计的基本公式有影响。当工程师开始设计时，他或她必须确定不会产生磁饱和的  $B_{DC}$  和  $B_{AC}$  的最大值。已被选择的磁性材料将限定这个饱和磁通密度。最大磁通密度的基本公式是

$$B_{\max} = \frac{0.4\pi N \left( I_{DC} + \frac{\Delta I}{2} \right) \times 10^{-4}}{l_g + \frac{MPL}{\mu_m}} \quad (\text{T}) \quad (1-35)$$

载有直流（DC）磁场且有空气隙的铁心电感器电感为

$$L = \frac{0.4\pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{l_g + \frac{MPL}{\mu_m}} \quad (\text{H}) \quad (1-36)$$

电感取决于磁路的等效长度，这个长度为空气隙长度  $l_g$  和磁心磁路长度与材料磁导率的比值  $(MPL/\mu_m)$  之和。空气隙尺寸的最后确定需要考虑边缘磁通的影响，这个影响是气隙的尺寸、磁极表面的形状和线圈的形状、尺寸和位置的函数。线圈长度即磁心的  $G$  尺寸对边缘磁通有很大的影响，请参阅图 1-34 和式 (1-37)。

边缘磁通减小了磁路的总磁阻。因此其电感值以一个系数  $F$  增加到比计算的值要

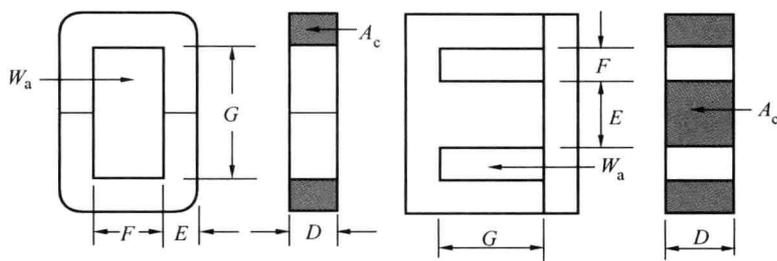


图 1-34 C形和E形磁心的尺寸

大，边缘磁通系数为

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_c}} \ln \frac{2G}{l_g} \quad (1-37)$$

在用式(1-36)计算电感以后，应该把边缘磁通系数引入式(1-36)中。这样式(1-36)可改写如下以包含这个边缘磁通系数

$$L = F \left[ \frac{0.4\pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{l_g + \frac{MPL}{\mu_m}} \right] \quad (H) \quad (1-38)$$

现在，我们可以把边缘磁通系数引入式(1-35)，这可事先检查磁心是否饱和。

$$B_{\max} = F \left[ \frac{0.4\pi N \left( I_{dk} + \frac{\Delta I}{2} \right) \times 10^{-4}}{l_g + \frac{MPL}{\mu_m}} \right] \quad (T) \quad (1-39)$$

现在，边缘磁通系数  $F$  已被了解且引入了式(1-38)。我们可以把式(1-38)改写以便求解不会发生过早的磁心饱和，所需要的线圈匝数为

$$N = \sqrt{\frac{L \left( l_g + \frac{MPL}{\mu_m} \right)}{0.4\pi A_c F \times 10^{-8}}} \quad (1-40)$$

## 边缘磁通与线圈的邻近度

当空气隙增加时，边缘磁通也将增加。边缘磁通将依气隙的长度向远离气隙的方向散去。如果线圈紧密地绕在磁心上并且包围着气隙，围绕着励磁导线产生的磁通将迫使边缘磁通回到磁心中。其最终结果将是：完全不产生任何边缘磁通，如图1-35所示。当线圈离开磁心一个距离时，边缘磁通将增加，直到线圈与磁心的距离等于气隙的尺寸。

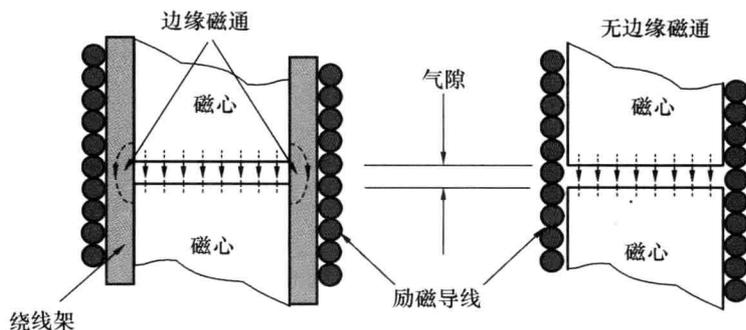


图 1-35 紧贴磁心绕线圈与在线圈架上绕线圈的比较

### 边缘磁通的聚集

磁通总是取具有最高磁导率的路径穿过，这在用交替搭接叠片构成的变压器中可以最清楚地看到，磁通沿叠片通过直到它碰到 I 或 E 的交接处。在这个交接处磁通将跳到邻近的叠片把这个交接处旁路，如图 1-36 所示。

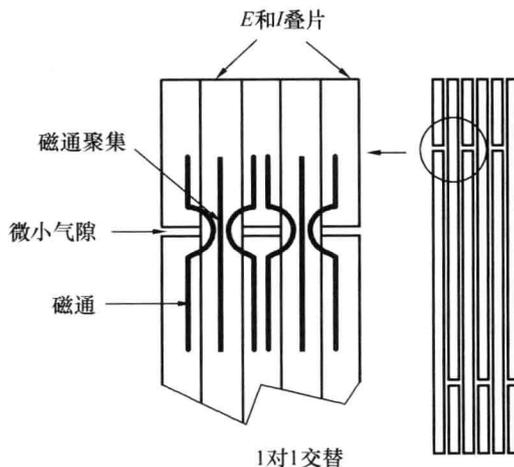


图 1-36 聚集于邻近叠片中的磁通

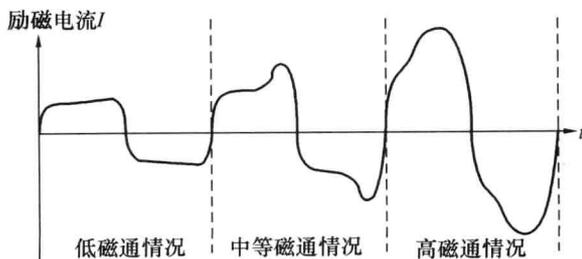


图 1-37 在不同的磁通密度水平时的励磁电流

这个现象可以通过观察在低、中和高磁通水平时的励磁电流来最清楚地看到，如图 1-37 所示。在小励磁时，励磁电流几乎是方波，这是由于如图 1-36 所示的磁通通过邻近叠片而取了高磁导率路径的缘故。当励磁增加时，邻近的叠片将开始饱和且励磁电流将增加且变得非线性<sup>❶</sup>。当邻近叠片达到饱和时，磁导率下降，然后磁通将直线地穿过如图 1-36 所示的微小气隙。

## 边缘磁通与粉末磁心

用低磁导率的粉末磁心设计高频变换器通常要求其匝数很少。低磁导率（小于 60）功率磁心会出现边缘磁通。具有分布气隙的粉末磁心会产生这样的边缘磁通，这个边缘磁通的效果好像是使气隙缩短并给人以比较高磁导率的印象。因为边缘磁通和匝数少，所以要以均匀一致的方式来绕制（线圈）是很重要的。这样绕制是可以控制边缘磁通并可获得一个一个电感量可重复的电感器，如图 1-38 和图 1-39 所示。

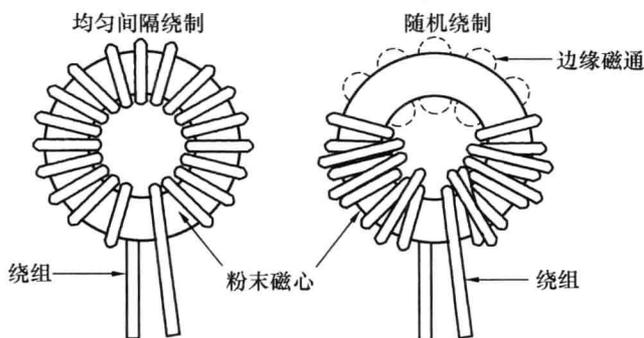


图 1-38 环形磁心不同线圈绕法的比较

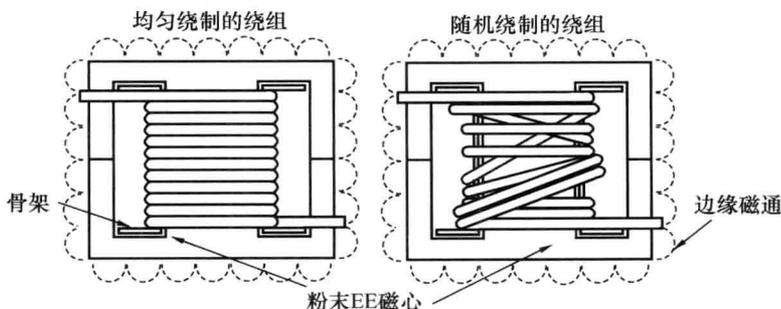


图 1-39 EE 磁心不同线圈绕法的比较

❶ 原文为 become nonlinear，这里似不应说电流变成非线性，而是磁心中的磁状态开始工作在  $B-H$  曲线的非线性区域，使励磁电流开始产生了尖峰波形（非方波）。

## 第2章

# 磁性材料及其特性

Chapter 2

学习更多电源知识请关注微信公众号：电源研发精英圈  
或搜索微信号：“dianyuankaifa”关注

# 目 次

导言 .....	25
饱和 .....	25
剩余磁通密度 $B_r$ 和矫顽力 $H_c$ .....	26
磁导率 $\mu$ .....	26
磁滞损失，电阻率 $\rho$ (磁心损失) .....	26
硅钢简介 .....	27
镍合金薄带简介 .....	27
金属玻璃简介 .....	30
软磁铁氧体简介 .....	32
锰-锌铁氧体 .....	33
镍-锌铁氧体 .....	33
铁氧体性能数据的相互对照 .....	35
钨坡莫合金粉末磁心简介 .....	36
铁粉末磁心简介 .....	36
磁心损失 .....	40
磁心损失公式 .....	41
磁性材料的选择 .....	44
典型的磁运行状态 .....	45
材料的特性 .....	45
磁性材料饱和的定义 .....	47
试验条件 .....	50
磁性材料饱和理论 .....	52
气隙效应 .....	53
开气隙的影响 .....	53
合成磁心结构 .....	60
小结 .....	63

## 导 言

磁性材料是磁器件设计中最重要角色。当进行一般的设计折中研究时，磁元件设计工程师有三个标准的词汇：成本、体积和性能，能综合解决好其中两个他就会很高兴。现在磁元件工程师设计的磁元件都工作在从音频范围以下到兆赫范围。通常要求他的设计做到尽可能好的性能，即具有尽可能小的寄生电容和漏电感。目前，工程师在工作中可用的磁性材料有硅钢、镍铁（坡莫合金）、钴铁（波明德）<sup>❶</sup>、非晶态金属合金和铁氧体。还有派生的变种，如钨坡莫合金粉末、铁硅铝磁合金粉末和铁粉末。工程师将根据其设计要求的磁特性从上述这些材料中进行比较选择。这些磁特性有：饱和磁感应强度  $B_s$ 、磁导率  $\mu$ 、电阻率  $\rho$ （磁心损失）、剩磁  $B_r$  和矫顽力  $H_c$ 。

## 饱 和

软磁材料的典型磁滞回线如图 2-1 所示。当磁场强度较高时会达到这样一点，在这一点进一步增加  $H$  时再不能引起  $B$  有利用价值的增加。这一点被称为该材料的饱和点。饱和磁通密度  $B_s$  和使磁心饱和所需要的磁场强度  $H_s$  如图 2-1 中虚线所示。

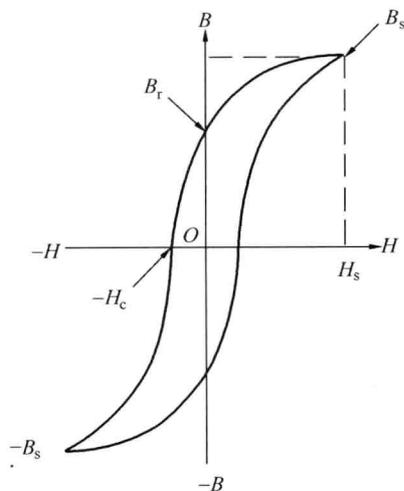


图 2-1 软磁材料典型的  $B-H$  回线

❶ 波明德：一种铁钴磁性合金，钴 50%、钒 1.8%~2.1%，其余为铁。

## 🔗 剩余磁通密度 $B_r$ 和矫顽力 $H_c$

在图 2-1 中，磁滞回线清楚地表示了剩余磁通密度  $B_r$ 。剩余磁通是励磁被撤销以后磁心中所保持的被磁化的磁通。磁场强度  $-H_c$  被称为矫顽力，它是把剩余磁通密度退回零所需磁场强度的大小。

## 🔗 磁导率 $\mu$

磁性材料的磁导率是材料被磁化难易程度的量度。磁导率  $\mu$  是磁通密度  $B$  对磁场强度  $H$  的比值，为

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2-1)$$

如图 2-1 中的磁滞回线所示， $B$  和  $H$  的关系不是线性的，而且很明显，比值  $B/H$  (磁导率) 也是变化的。磁导率随磁通密度的变化如图 2-2 所示。图中还示出了磁导率最大点的磁通密度。

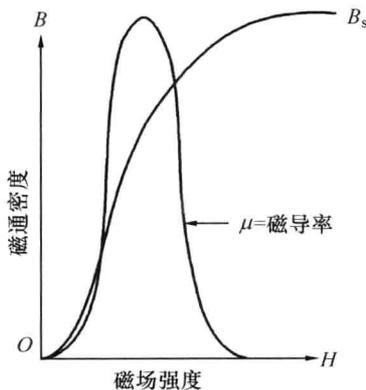


图 2-2 磁导率  $\mu$  随  $B$  和  $H$  的变化

## 🔗 磁滞损失，电阻率 $\rho$ (磁心损失)

图 2-1 中所示磁滞回线内部包围的面积是磁心材料在被磁化的那个周期中能量损失的量度。这个损失由两个成分构成：①磁滞损失；②涡流损失。磁滞损失是当磁性材料处在周期被励磁状态时的能量损失。涡流损失是当磁通线通过磁心在磁心中感应出电流所引起的能量损失。这些电流被称为涡流，它们在磁心中产生热，如果磁心的电阻高，则这个电流将低，因此，低损失材料的特点是高电阻。通常情况下，在设计磁性器件时，磁心损失是一个主要的设计指标。磁心损失可以通过选择正确的材料及其厚度来控制。

制。选择正确的材料和运行在它规定的极限之内会防止其过热，过热可能导致导线绝缘和/或封装（灌注）化合物的损坏。

## 硅钢简介

硅钢是最早被用于变压器和电感器的合金之一。多年间，它已经有了很大的改进，或许它是被最广泛采用的磁性材料。原来钢的一个缺点是当材料用的时间过长时，其损失会增加。后来通过把硅加到钢中，有两个方面的优点：①增加了电阻率；②减低了涡流损失和改善了材料的时间稳定性。

硅钢提供高饱和磁通密度、在高磁通密度时相当满意的磁导率和在音频下适中的损失。对硅钢所做的一个重要改善是在被称为冷轧晶粒取向的 AISI<sup>①</sup>M6 产生过程中，这个 M6 晶粒取向钢具有格外低的损失和高的磁导率。它被用于要求高性能和损失处于最小化的场合。

## 镍合金薄带简介

高磁导率金属合金主要建立在镍—铁系统基础之上。虽然 Hopkinson 早在 1889 年就试验研究了镍—铁合金，但是直到大约 1913 年，Elmen 开始研究其在弱磁场中的特性以及热处理的影响以后，镍—铁合金的重要性才被认识。Elmen 把他的镍—铁合金称为“坡莫合金”。他的第一个专利在 1916 年被编入档。他比较喜欢的成分是 78Ni-50Fe 合金。在 Elmen 之后不久，Yensen 开始了一个独立的研究，结果产生了 50Ni-50Fe 合金“Hipcrnik”（海波尼克高磁导率镍钢）。它的磁导率和电阻率比 78-坡莫合金低，但其饱和磁通密度比 78-坡莫合金高（1.5T 对 0.75T），使它能更好地用于功率设备中。

镍—铁（Ni-Fe）合金性能的改善是通过在氢气中的高温退火获得的，这是 Yensen 首先报告的。接下来的改善是通过利用晶粒取向材料，在处于氢气中的磁场中退火做到的，这个工作是由 Kelsall 和 Bozorth 完成的。利用这两个方法得到了被称为镍铁钼超导磁合金（Supermalloy）的新材料。它与 78-坡莫合金相比，具有更高的磁导率，更低的矫顽力和大致相同的饱和磁通密度。或许上述措施中最主要的是在磁场中退火，它不仅提高了磁导率，还提供了“矩形”的磁滞回线，这对高频功率变换设备是很重要的。

为了获得高电阻以使在音频应用中磁心损失低，有以下两个方法：①变更金属合金的形式；②开发具有磁性能的氧化物。结果在 20 世纪 20 年代开发了薄带状合金和粉末状合金。20 世纪 50 年代开发出了薄膜状合金。从 20 世纪 60 年代中期到现在，薄膜的发展一直被航空航天功率变换电子技术的需求推动着。

① AISI=American Iron and Steel Institute，为美国钢铁学会。

可以买到厚度为 2 密耳 (mil)<sup>①</sup>、1 密耳、0.5 密耳、0.25 密耳和 0.125 密耳的镍—铁 (Ni-Fe) 合金。这些材料具有回环形或矩形的  $B-H$  回线。这给了工程师一个很宽的尺寸和结构方面的范围来为自己的设计进行选择。表 2-1 中示出了某些最常用的铁合金材料特性。在表 2-1 中还给出了每种磁性材料的  $B-H$  回线图号。

表 2-1 可供选择的铁合金材料的磁特性

材料名称	成分	初始磁导率 $\mu_i$	磁通密度 $B_s/T$	居里温度 / $^{\circ}C$	直流矫顽力/Oe	密度/(g/cm <sup>3</sup> ) $\delta$	质量系数 $\chi$	典型 $B-H$ 回线的图号
硅钢 (Silicon)	3%Si 97%Fe	1.5k	1.5~1.8	750	0.4~0.6	7.63	1.000	(2-3)
铁钴钒 (矩磁) 合金* (Supermendur)	49%Co 49%Fe 2%V	0.8k	1.9~2.2	940	0.15~0.35	8.15	1.068	(2-4)
具有矩形磁滞回线的铁心材料 (Ortholon)	50%Ni 50%Fe	2k	1.42~1.58	500	0.1~0.2	8.24	1.080	(2-5)
坡莫合金 (Permalloy)	79%Ni 17%Fe 4%Mo	12k~100k	0.66~0.82	460	0.02~0.04	8.73	1.144	(2-6)
镍铁钼超导磁合金 (Supermalloy)	78%Ni 17%Fe 5%Mo	10k~50k	0.65~0.82	460	0.003~0.008	8.76	1.148	(2-7)

注 硅钢的质量系数为 1。

\* 磁场退火。

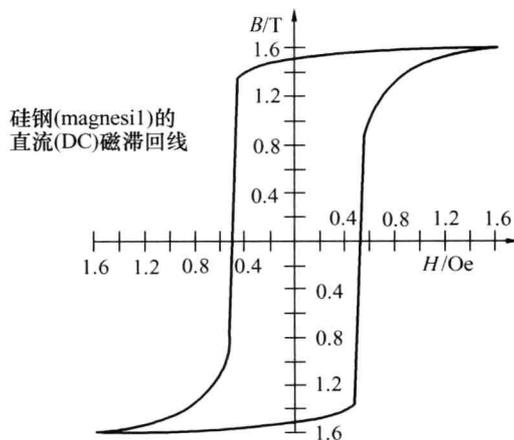


图 2-3 硅钢 (97%Fe, 3%Si) 的  $B-H$  回线

① mil (密耳): 金属线直径或薄板厚度的单位。等于 0.001in, 1in=2.54cm。圆密耳: 面积单位, 1 圆密耳为直径为 1 密耳的金属丝截面积。

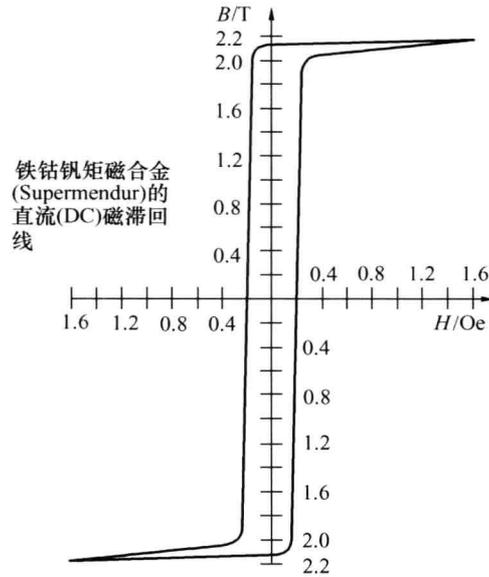


图 2-4 铁钴钒矩磁合金 (49%Fe, 49%Cu, 2%V) 的  $B-H$  回线

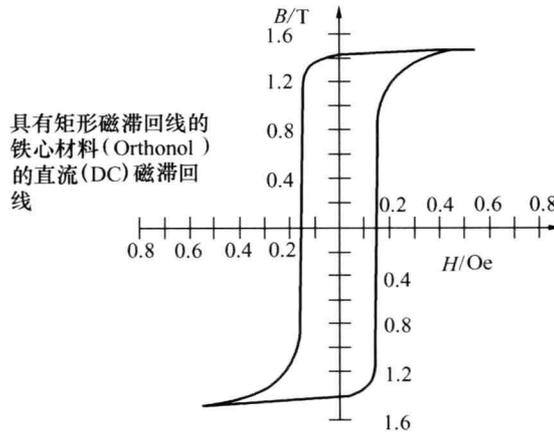


图 2-5 奥则闹尔 (Orthonol, 具有矩形磁滞回线的铁心材料 50%Fe, 50%Ni) 的  $B-H$  回线

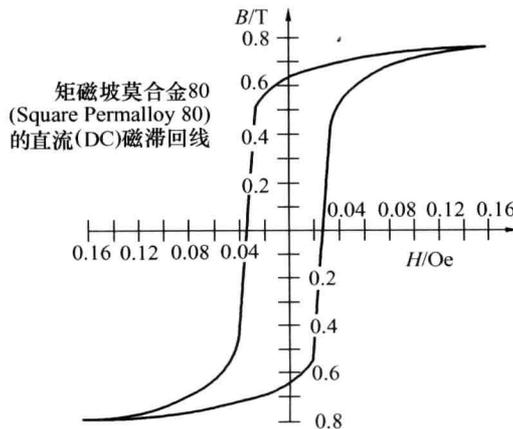


图 2-6 矩磁坡莫合金 80 (79%Ni, 17%Fe, 4%Mo) 的  $B-H$  回线

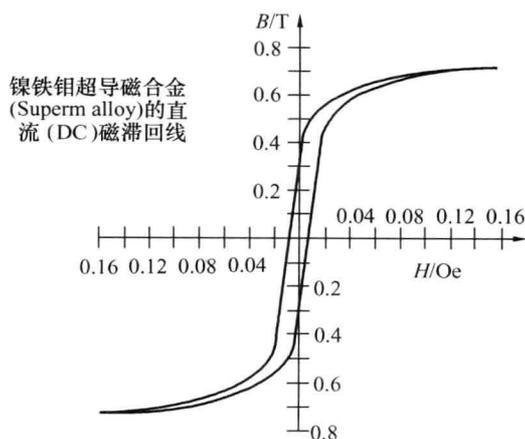


图 2-7 镍铁钼超导磁合金 (78%Ni, 17%Fe, 5%Mo) 的  $B-H$  回线

## 金属玻璃简介

在材料科学家中间引起广泛注意的金属玻璃第一次合成发生在 1960 年, Klement、Willens 和 Duwez 报告了金硅合金液体当其快速急冷到液态氮的温度时, 会形成非晶态固体, 12 年后 Chen 和 Polk 生产出了具有显著延展性、形状可用的铁基金属玻璃。从那时起, 金属玻璃经过了从实验室到实用产品的过渡。目前它是深入的技术和基础研究的焦点。

金属玻璃一般是由液体急冷生产的。在这个过程中, 熔化的金属合金以  $10^5 \text{ }^\circ\text{C/s}$  数量级的速度快速冷却, 通过这样快速冷却的温度发生了结晶过程。晶体金属(标准的磁性材料)和玻璃状金属的基本不同在于它们的原子结构。晶体金属是由规则的三维原子阵列构成, 这些原子排列长短有序。金属玻璃没有长短有序结构。尽管它们的结构不同, 而成分相同的晶体金属和玻璃状金属, 其密度是接近相同的。

金属玻璃的电阻率比类似成分晶体金属的电阻率大得多(高 3 倍以上)。电阻率的大小以及它们的温度系数在玻璃状态和液体状态中都几乎是相同的。

金属玻璃在磁性方面是相当“软”的。所谓“软”是指施加小的磁场会产生大的磁化响应, 而大的磁化响应在诸如变压器和电感器的应用中是很希望的。这些新材料的明显优点是在高频应用中的高磁感应强度、高磁导率和低磁心损失。

有四种非晶态材料已经用于高频的应用中: 2605SC、2714A、2714AF 和 Vitroperm 500F。材料 2605SC 提供出高电阻率、高饱和磁感应强度和低磁心损失的极好组合, 使它适合用来设计高频直流 (DC) 电感器。材料 2714A 是一种钴类材料, 它提供出极好的高电阻率、高矩形比  $B_r/B_s$  和很低的磁心损失, 使它适合用来设计高频航空航天变压器和磁放大器。Vitreperm 500F 是铁基材料, 具有 1.2T 的饱和磁通密度, 非常适合于设计高频变压器和开气隙的电感器。用毫微 ( $10^{-9}$ ) 晶 500F 制造的高频磁

心损失甚至在高磁通密度下工作时也比某些铁氧体的损失低。几种最常用的非晶态材料特性见表 2-2。表 2-2 还给出了每种磁性材料  $B-H$  回线的图号。

• 表 2-2 几种最常用的非晶态材料磁特性

材料名称	主要成分	初始磁导率 $\mu_i$	磁通密度 $B_s$	居里温度 / $^{\circ}\text{C}$	DC (直流) 矫顽力/Oe	密度/(g/cm $^3$ ) $\delta$	质量系数 $\chi$	典型 $B-H$ 回线的图号
2605SC	81%Fe 13.5%B 3.5%Si	1.5k	1.5~1.6	370	0.4~0.6	7.32	0.957	(2-8)
2714A	66%Co 15%Si 4%Fe	0.8k	0.5~0.65	205	0.15~0.35	7.59	0.995	(2-9)
2714AF	66%Co 15%Si 4%Fe	2k	0.5~0.65	205	0.1~0.2	7.59	0.995	(2-10)
毫微晶 Vitroperm 500F*	73.5%Fe 1%Cu 15.5%Si	30k~80k	1.0~1.2	460	0.02~0.04	7.73	1.013	(2-11)

注  $\chi$  硅钢的质量系数为 1，见表 2-1。

\* Vitroperm 是 Vacuumschmelze 的商标。

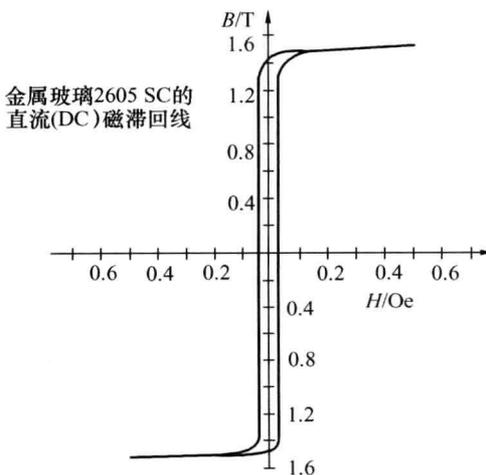


图 2-8 非晶态 2605SC (81%Fe, 13.5%B, 3.5%Si) 的  $B-H$  回线

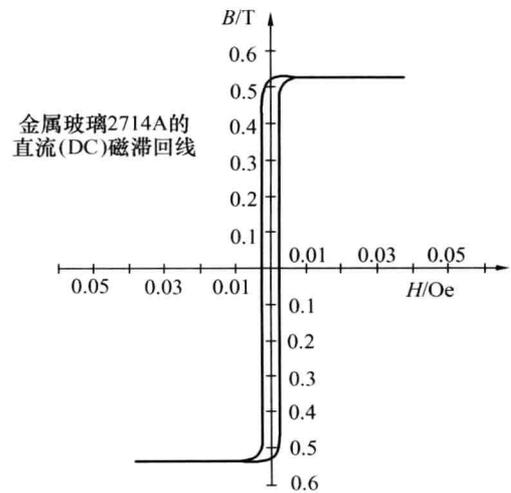


图 2-9 非晶态 2714A (66%Cu, 15%Si, 5%Fe) 的  $B-H$  曲线

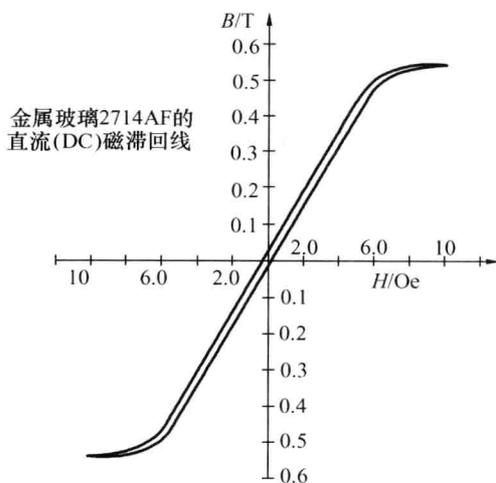


图 2-10 非晶态 2714AF (66%Co, 15%Si, 4%Fe) 的  $B-H$  回线

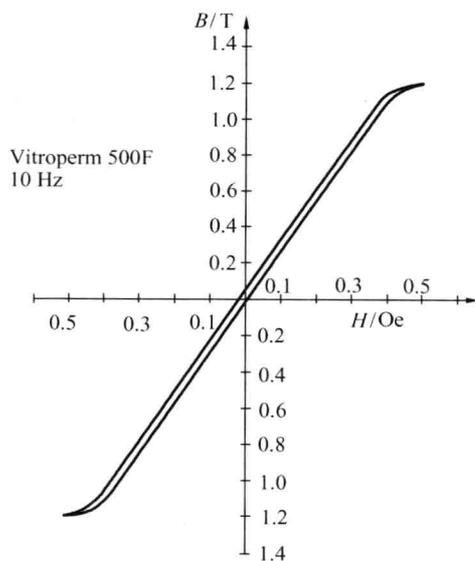


图 2-11 Vitroperm 500F (73.5%Fe, 15.5%Si, 1%Cu) 的  $B-H$  回线

## 软磁铁氧体简介

在电力工业的早期中，对于不可缺少的磁性材料需求是由铁和它的磁性合金来充当的。但是，随着较高频率应用的到来，标准的减少涡流损失技术（利用叠片或铁粉心）不再有效或丧失了有效性。

这个认识重新促进了对磁绝缘体的兴趣，正如德国的 S. Hilpert 在 1909 年最先报告的那样。很容易理解，如果能够把氧化物的高电阻率与希望的磁特性相结合，那么特别适用于在高频下工作的磁性材料就会产生。

开发这样材料的研究由科学家在全世界众多实验室中进行着，诸如 V. Kato、T. Takei 和 N. Kawai 于 20 世纪 30 年代在日本；飞利浦研究实验室的 J. Snoek 于 1935~1945 年期间在荷兰；不迟于 1945 年，Snoek 建立了实际的铁氧体材料物理和技术基础。

铁氧体是由氧化物组成的均匀陶瓷材料，铁氧化物是其主要成分。软磁铁氧体可以分成两个主要类别：锰-锌和镍-锌。在每个类别中，改变化学成分或制造方法可以制造出很多不同的锰-锌和镍-锌材料的分类别。锰-锌和镍-锌两类铁氧体材料彼此互补，使软磁铁氧体的应用可以从音频直到几百兆赫。制造商们不愿意在同一地方加工，即不愿意与镍-锌一起制造锰-锌铁氧体，因为这样其中一种会污染另一种，从而导致其性能变坏。锰-锌和镍-锌之间的主要不同点见表 2-3，最大的不同是锰-锌具有较高的磁导率，而镍-锌具有较高的电阻率。表 2-4 中示出了几种最常用的铁氧体材料。在表 2-4 中还给出了每种材料  $B-H$  回线的图号。

表 2-3 锰-锌与镍-锌基本特性的比较

材料	初始磁导率 $\mu_i$	磁通密度 $B_{\max}/T$	居里温度 /°C	DC (直流) 矫顽力 $H_c/Oe$	电阻率 / $\Omega\text{cm}$
锰-锌	750~15k	0.3~0.5	100~300	0.04~0.25	10~100
镍-锌	15~1500	0.3~0.5	150~450	0.3~0.5	$10^6$

表 2-4 可供选择的铁氧体材料磁特性

Magnetics* 的 材料名称	初始磁导率 $\mu_i$	磁通密度 $B_s/T$	剩磁 $B_r/T$	居里温度 /°C	DC (直流) 矫顽力 $H_c$ Oe	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	典型的 B-H 回线的图号
K	1500	0.48T	0.08T	>230	0.2	4.7	(2-12)
R	2300	0.50T	0.12T	>230	0.18	4.8	(2-13)
P	2500	0.50T	0.12T	>230	0.18	4.8	(2-13)
F	5000	0.49T	0.10T	>250	0.2	4.8	(2-14)
W	10000	0.43T	0.07T	>125	0.15	4.8	(2-15)
H	15000	0.43T	0.07T	>125	0.15	4.8	(2-15)

\* Magnetics 是 Spang & Company 公司磁器件分部。

## 锰 - 锌 铁 氧 体

这类软磁铁氧体是最常见的，它比镍-锌铁氧体应用的场合更多。在锰-锌类别中，大量材料变种是可能的。锰-锌铁氧体主要用在低于 2MHz 的频率上。

## 镍 - 锌 铁 氧 体

这类软磁铁氧体以高材料电阻率为特征。其电阻率的大小比锰-锌铁氧体要高几个数量级。因为它的电阻率高，镍-锌铁氧体就成为工作频率从 1~2MHz 直到几百兆赫时可选择的材料。

当气隙尺寸相当大时，材料磁导率  $\mu_m$  对有效磁导率  $\mu_e$  几乎没有影响，见表 2-5。

表 2-5 磁导率和它对含气隙电感器的影响

材料*	$\mu_m$	气隙/in	气隙/cm	MPL/cm**	$\mu_e$
K	1500	0.04	0.101	10.4	96
R	2300	0.04	0.101	10.4	98
P	2500	0.04	0.101	10.4	99
F	3000	0.04	0.101	10.4	100

\* 此处的材料取自于 Spang Company 公司磁器件部。

\*\* 此为磁心 ETD44 的磁路长度。

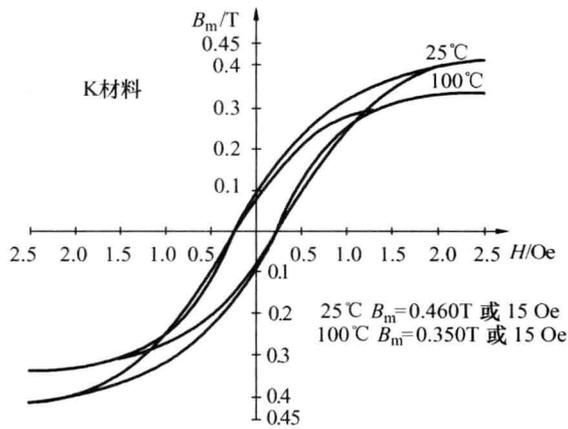


图 2-12 铁氧体 (K 材料, 在 25°C 和 100°C 时) 的  $B$ - $H$  回线

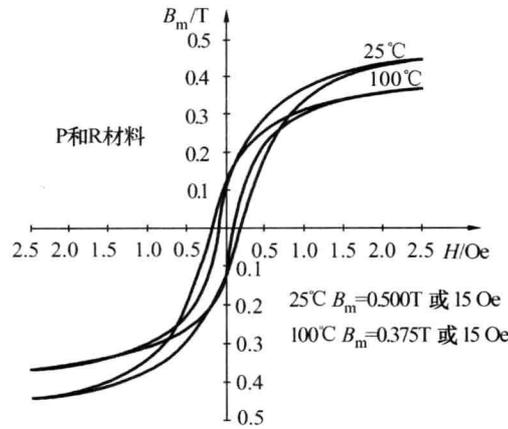


图 2-13 铁氧体 (P 和 R 材料, 在 25°C 和 100°C 时) 的  $B$ - $H$  回线

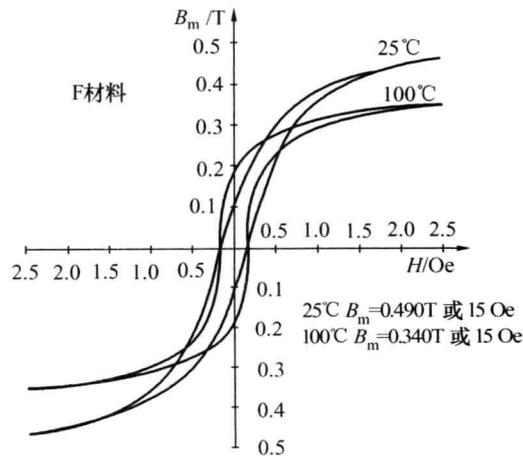


图 2-14 铁氧体 (F 材料在 25°C 和 100°C 时) 的  $B$ - $H$  回线

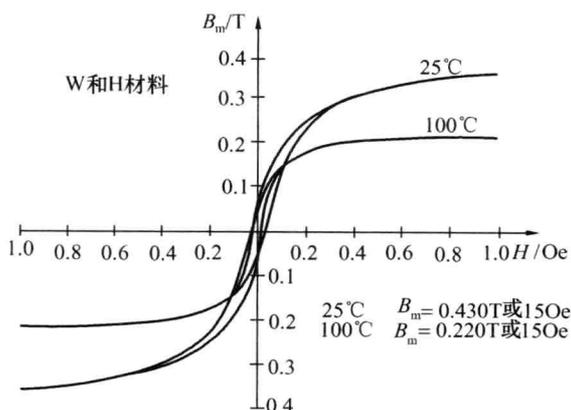


图 2-15 铁氧体 (W 和 H 材料在 25°C 和 100°C 时) 的 B-H 回线

### 铁氧体性能数据的相互对照

表 2-6 的相互参照把一些一流的铁氧体生产厂商的数据放在一起。这些铁氧体材料被组织起来并与磁学公司的材料对照。这是因为磁学公司 (Magnetics) 拥有一个最庞大的标准铁氧体材料生产线。

表 2-6 铁氧体材料，不同生产厂商的相互对照

磁导率	1500	2300	2500	3000	5000	10000	15000
应用领域	功率	功率	功率	功率	滤波器	滤波器	滤波器
生产厂商	材料名称						
Magnetics	1 K	2 R	3 P	F	J	W	H
Ferroxcube	3F35	3F3	3C94	3C81	3E27	3E5	3E7
磁导率, $\mu_i$	1400	2000	2300	2700	6000	10000	15000
Fair-Rite			78		75	76	
磁导率, $\mu_i$			2300		5000	10000	
Siemens	N49	N78	N67	T41	T35	T38	T46
磁导率, $\mu_i$	1300	2200	2100	3000	6000	10000	15000
TDK 公司	PC50	PC40	PC44	H5A	HP5	H5C2	H5C3
磁导率, $\mu_i$	1400	2300	2400	3300	5000	10000	15000
MMG		F44	F5	F5C	F-10	F-39	
磁导率, $\mu_i$		1900	2000	3000	6000	10000	
Ceramic Mag	MN67	MN80	MN80	MN8CX	MN60	MC25	MC15K
磁导率, $\mu_i$	1000	2000	2000	3000	6000	10000	15000
Tokin		HBM	B25	B3100	H5000	H12000	
磁导率, $\mu_i$							
Ferrite Int	TSF-5099	TSF-7099	TSF-7070	TSF-8040	TSF-5000	TSF-010K	
磁导率, $\mu_i$	2000	2000	2200	3100	5000	10000	

注 1. 可用于高频功率的材料，250kHz 和以上。  
 2. 在 80~100°C，25~250kHz 下有最小的损失。  
 3. 在 60~80°C 下有最小的损失。

## 钼坡莫合金粉末磁心简介

镍-铁高磁导率磁性合金(坡莫合金)于1923和1927年被发现。坡莫合金成功地用在了粉末磁心中，对当时的载波通信作出了很大的贡献。

在20世纪40年代初期，一个新的以钼坡莫合金粉末(MPP, Molybdenum Permalloy Powder)作为商标的材料，由贝尔电话实验室和西方电气公司(Western Electric Company)开发成磁心。这种磁心被用于电话设备中的负载线圈、滤波线圈、音频和载波频率下的变压器。这样的磁心利用已经扩展到许多工业和军事电路。磁导率和磁心损失随时间、温度的稳定性和磁通水平的高低，对设计调谐电路和定时电路的工程师而言是特别重要的。这个新的材料对所有过去的磁粉心而言都给出了更可靠的和更优良的性能。

钼坡莫合金粉末[2个钼(Mo)，82个镍(Ni)，16个铁(Fe)]是通过研磨、热轧和使熔炼的金属脆化而制成。然后，合金被绝缘和过筛，对于在音频范围的应用筛到每平方英寸120个孔眼的细度，对于在高频下的应用筛到为每平方英寸400个孔眼的细度。

在功率变换领域，MPP磁心在开关电源中造成的影响最大。MPP磁心和功率MOS场效应晶体管的应用使得工作效率增加，导致了计算机系统的更高紧凑度和质量减小。电源是系统的核心，当电源被正确地设计，采用了合适的温升时，系统将会延长其寿命。

在这些功率系统中，有开关型电感器、平滑扼流线圈、共模滤波器、输入滤波器、输出滤波器、功率变压器、电流变压器(亦称电流互感器——译者注)和脉冲变压器。采用MPP，不可能对上述所有器件都会得到最佳的设计，但是，在某些情况下，MPP磁心是唯一能在可得到空间内以合适的温升运行的磁心。

## 铁粉末磁心简介

开发压制的铁粉末磁心作为用于电感线圈中的磁性材料是贝尔电话实验室的工程师们在寻找优良铁-导线磁心代替物的工作中引出的。铁粉末磁心的利用是Heaviside在1887年和Dolezalek在1900年再次提出的。

第一个具有商业价值特性的铁粉末磁心是由Buckner Speed于1918年发布的美国专利No.1274952中描述的。Buckner Speed和G. W. Elman 1921年在A. I. E. E. Transactions [美国电气工程师学会(American Institute of Electrical Engineers)会刊]上发表了一篇文章《压成粉末的铁的磁特性》。这篇文章叙述了一种磁性材料。这种材料非常适于构成诸如在电话系统中所用的小电感线圈和变压器中的磁心。这些铁粉末磁心是由80个筛目的电解铁粉末制造的。材料被退火，然后通过多个微粒表面的氧化使

其绝缘。用这种方法，得到了非常细而韧的铁微粒。当压制这些磁心时，其微粒不会被打碎。一种虫胶溶液被加到已被绝缘的粉末上作为进一步的绝缘物和黏合剂。这就是大约1929年之前，西方电气公司制造环形铁磁心的方法。今天铁粉末磁心的制造方法几乎没什么变化，只是用高纯的铁粉末和更多外来的绝缘物和黏合剂。准备好了的粉末在极高压下压制形成固体样子的磁心，这个过程造成了具有分布空气隙的磁结构。铁本身的高饱和磁通密度与分布的空气隙相结合，产生了初始磁导率小于100和具有高能量存储能力的磁心材料。

直流(DC)电流不产生磁心损失。但是交流电流(AC)或纹波电流产生磁心损失。铁粉末材料具有比某些较贵的磁心材料较高的磁心损失。多数具有直流偏置的电感器，其纹波电流的百分比都较小，因此，磁心损失是很小的。但是，在高频纹波电流百分比比较高的情况下，磁心损失有时会成为其应用的一个限制因素。我们不推荐把铁粉心用于载有不连续电流的电感器或具有大交流磁通摆动的变压器中。

低成本的铁粉心在当今低频和开关型功率变换中的典型应用，如制成差模、输入和输出功率电感器。因为铁粉心的磁导率低，所以，为制造具有合适的电感以使交流(AC)磁通很小而需要相当多的匝数。采用铁粉心的代价通常在磁器件的尺寸和效率方面。

有四种标准的粉末材料可买来用于磁功率器件：钼坡莫合金(MMP)粉末磁心，其曲线族如图2-20所示；高磁通(HF)粉末磁心，其曲线族如图2-21所示；铁硅铝合金粉末磁心(Kool M $\mu$ )<sup>①</sup>，其曲线族如图2-22所示；铁粉末磁心，其曲线族如图2-23所示。粉末磁心可获有各种各样的磁导率，这就给了工程师宽广的范围以使其设计优化。用最常见的材料制成的粉末磁心特性见表2-7。在表2-7中还给出了每种粉末磁心材料B-H回线的图号。表2-8是每种粉末磁心材料最常见磁导率一览表。

表 2-7 粉末磁心材料特性

材料名称	成分	初始磁导率 $\mu_i$	磁通密度 $B_s/T$	居里温度 /°C	DC(直流) 矫顽力 $H_c$ /Oe	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	典型的 B-H 回线图号
钼坡莫合金 (MPP)	80%Ni 20%Fe	14~550	0.7	450	0.3	8.5	(2-16)
高磁通 (High Flux)	50%Ni 50%Fe	14~160	1.5	360	1	80	(2-17)
铁硅铝 (Kool M $\mu$ )	85%Fe 9%Si 6%Al	26~125	1	740	0.5	6.15	(2-18)
铁粉末 (Iron Powder)	100%Fe	4.0~100	0.5~1.4	770	5.0~9.0	3.3~7.2	(2-19)

① Spang 和 Company 公司磁器件分部的商品名。

表 2-8 标准粉末磁心磁导率

粉末材料	钼坡莫合金粉心	高磁通粉心	铁硅铝粉心	铁粉心
初始磁导率 $\mu_i$				
10				×
14	×	×		
26	×	×	×	
35				×
55				×
60	×	×	×	×
75			×	×
90			×	
100				×
125	×	×	×	
147	×	×		
160	×	×		
173	×			
200	×			
300	×			
550	×			

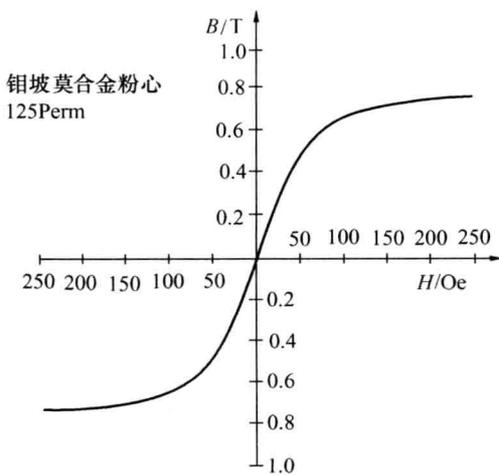


图 2-16 钼坡莫合金粉末磁心 (125Perm)

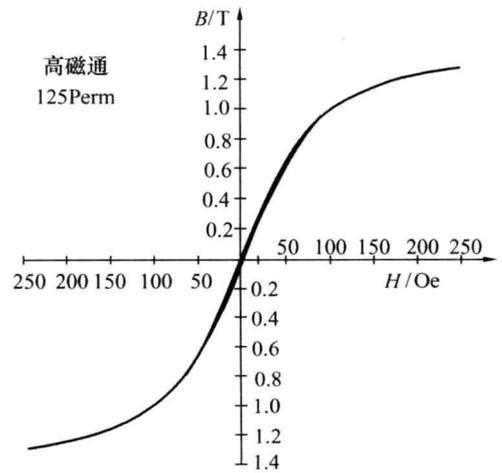


图 2-17 高磁通粉末磁心 (125Perm)

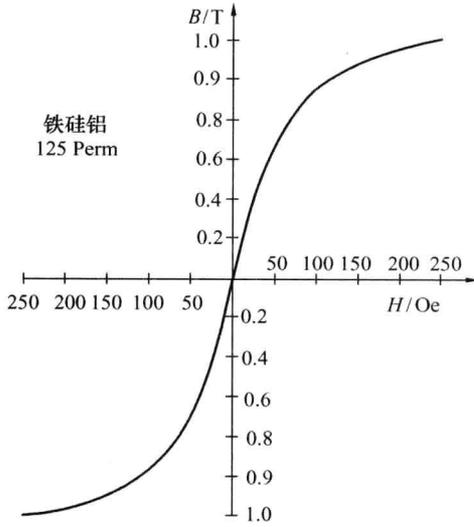


图 2-18 铁硅铝 (Kool M $\mu$ ) 粉末磁心 (125Perm)

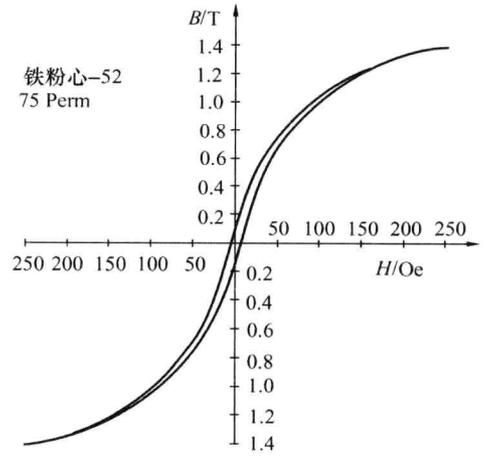


图 2-19 铁粉末 (-52) 磁心 (75Perm)

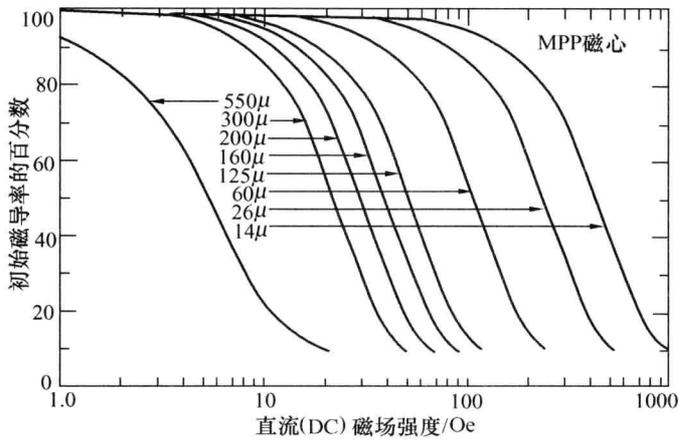


图 2-20 钕坡莫合金粉末磁心磁导率与直流 (DC) 偏置的关系曲线

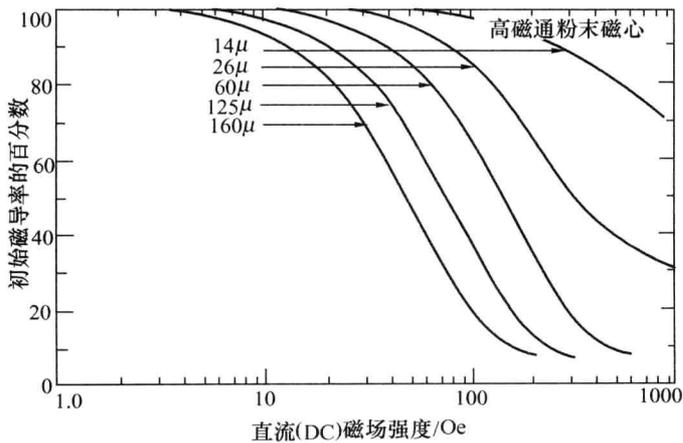


图 2-21 高磁通磁粉心磁导率与直流 (DC) 偏置的关系曲线

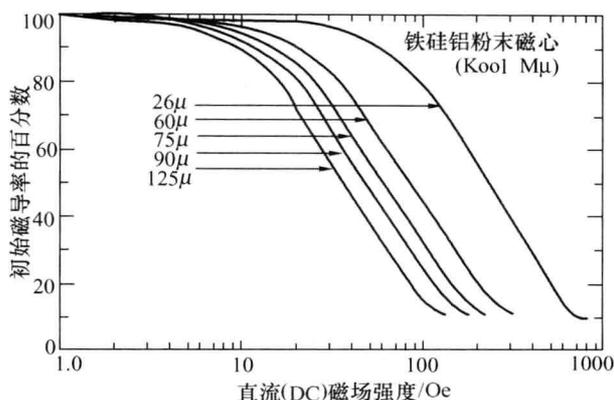


图 2-22 铁硅铝 (soudust) 磁粉心磁导率与直流 (DC) 偏置的关系曲线

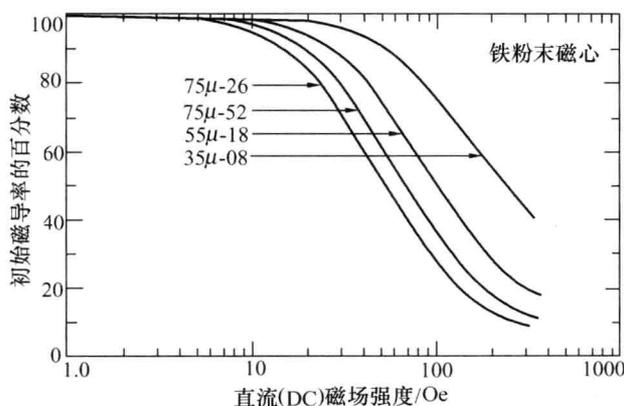


图 2-23 铁粉心磁导率与直流 (DC) 偏置的关系曲线

## 磁 心 损 失

功率磁器件——如变压器和电感器的设计者需要这些器件中磁性材料电特性和磁特性的知识。有两种磁特性是有重要意义的，即直流 (DC) 特性和交流 (AC) 特性。直流  $B-H$  回线是用来对不同类型的磁性材料进行比较的有用依据。交流 (AC) 磁特性对设计工程师也是有重要意义的。一个最重要的交流 (AC) 特性就是磁心损失。交流磁心损失是其磁性材料、磁性材料的厚度、磁通密度  $B_{AC}$ 、频率  $f$  和工作温度的函数。因此，磁性材料的选择是建立在对成本、体积和性能等指标折中而获得最好特性的基础之上的。

不是所有的厂商在叙述他们的磁心损失时都用相同的单位。在对不同的磁性材料进行比较时，使用者应该知道磁心损失的不同单位。典型的磁心损失图如图 2-24 所示。其纵坐标是磁心损失，横坐标是磁通密度，磁心损失数据对不同的频率画出，如图 2-24 所示。

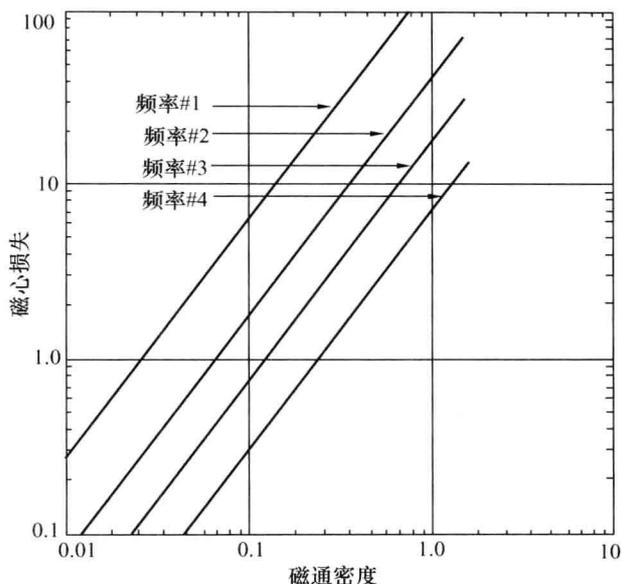


图 2-24 典型的在不同频率下磁心损失图

纵坐标：制造厂商所用磁心损失单位一览表

1. 瓦特每磅 (W/P)
2. 瓦特每千克 (W/kg)
3. 毫瓦每克 (mW/g)
4. 毫瓦每立方厘米 (mW/cm<sup>3</sup>)

横坐标：制造厂商所用磁通密度单位一览表

1. 高斯 (Gs)
2. 千高斯 (kGs)
3. 特斯拉 (T)
4. 毫特斯拉 (mT)

频率数据可以用赫兹 (Hz) 或千赫兹 (kHz) 表示。

## 磁心损失公式

目前，制造厂商以公式的形式提供磁心损失，如

$$W/kg \text{ (瓦特/千克)} = k f^{(m)} B^{(n)} \quad (2-2)$$

式中的单位是随厂商的不同会有变化的。在下面的表中，数据被改成公制单位，即高斯变为特斯拉，瓦特每磅变为瓦特每千克。对 Magnetics Inc (磁学公司) 的钕坡莫合金粉末磁心 (MPP) 采用式 (2-2) 时的系数见表 2-9。Magnetics Inc 高磁通粉末磁心 (HF) 采用式 (2-2) 时的系数见表 2-10。对 Magnetics Inc 铁硅铝粉末磁心 (Kool M $\mu$ ) 采用式 (2-2) 时的系数见表 2-11。对铁合金材料采用式 (2-2) 时的系数见表 2-12。

表 2-9 MPP 粉末磁心的磁心损失系数

Spang & Company 公司磁器件公司 (Magnetics) 的 MPP 粉末磁心				
材料	磁导率 $\mu$	系数 $k$	系数 $m$	系数 $n$
MPP	14	0.005980	1.320	2.210
MPP	26	0.001190	1.410	2.180
MPP	60	0.000788	1.410	2.240
MPP	125	0.001780	1.400	2.310
MPP	147~160~173	0.000489	1.500	2.250
MPP	200~300	0.000250	1.640	2.270
MPP	550	0.001320	1.590	2.360

表 2-10 高磁通粉末磁心的磁心损失系数

Spang & Company 公司磁器件公司 (Magnetics) 的 HF 粉末磁心				
材料	磁导率 $\mu$	系数 $k$	系数 $m$	系数 $n$
高磁通粉末 磁心	14	$4.8667 \times 10^{-7}$	1.26	2.52
	26	$3.0702 \times 10^{-7}$	1.25	2.55
	60	$2.0304 \times 10^{-7}$	1.23	2.56
	125	$1.1627 \times 10^{-7}$	1.32	2.59
	147	$2.3209 \times 10^{-7}$	1.41	2.56
	160	$2.3209 \times 10^{-7}$	1.41	2.56

表 2-11 铁硅铝粉末磁心的磁心损失系数

Spang & Company 公司磁器件公司 (Magnetics) 的 Kool · M $\mu$ 粉末磁心				
材料	磁导率 $\mu$	系数 $k$	系数 $m$	系数 $n$
铁硅铝粉末磁心	26	0.000693	1.460	2.000
	60	0.000634		
	75	0.000620		
	90	0.000614		
	125	0.000596		

表 2-12 铁合金磁心的磁心损失系数

铁合金					
材料	厚度/mils	频率范围	系数 $k$	系数 $m$	系数 $n$
50/50 镍-铁 (50/50Ni-Fe)	1.00		0.0028100	1.210	1.380
	2.00		0.0005590	1.410	1.270
	4.00		0.0006180	1.480	1.440

续表

铁合金					
材料	厚度/mils	频率范围	系数 $k$	系数 $m$	系数 $n$
铁钴钒 (矩磁) 合金 (Supermendur)	2.00	400Hz	0.0236000	1.050	1.300
	4.00		0.0056400	1.270	1.360
坡莫合金 80 (Permalloy 80)	1.00		0.0000774	1.500	1.800
	2.00		0.0001650	1.410	1.770
	4.00		0.0002410	1.540	1.990
镍铁钼超导 磁合金 (Supermalloy)	1.00		0.0002460	1.350	1.910
	2.00		0.0001790	1.480	2.150
	4.00		0.0000936	1.660	2.060
硅钢 (Silicon)	1.00	50~60Hz	0.0593000	0.993	1.740
	2.00		0.0059700	1.260	1.730
	4.00		0.0035700	1.320	1.710
	12.00		0.0014900	1.550	1.870
	14.00		0.0005570	1.680	1.860
	24M27non-or		0.0386000	1.000	2.092

对于非晶态材料采用式 (2-2) 时的系数见表 2-13。对于磁器件公司 (Magnetics) 的铁氧体材料采用式 (2-2) 时的系数见表 2-14。对微金属公司 (Micrometals) 铁粉末磁心材料采用式 (2-3) 时的系数见表 2-15。

$$\text{watts/kilogram} = k \left[ \frac{fB_{AC}^3 \times 10^9}{(a) + 681(b)B_{AC}^{0.7} + 2.512 \times 10^6 (c)B_{AC}^{1.35}} \right] + 100df^2 B_{AC}^2 \quad (2-3)$$

表 2-13 非晶态材料的磁心损失系数

非晶态合金				
材料	厚度/mils	系数 $k$	系数 $m$	系数 $n$
2605SC	0.80	$8.79 \times 10^{-6}$	1.730	2.230
2714A	0.80	$10.1 \times 10^{-6}$	1.550	1.670
Vitroperm 500	0.80	$0.864 \times 10^{-6}$	1.834	2.112

表 2-14 磁器件公司 (Magnetics) 铁氧体材料磁心损失系数

磁器件公司 (Magnetics) 的铁氧体磁心材料				
材料	频率范围	系数 $k$	系数 $m$	系数 $n$
K	$f < 500\text{kHz}$	$2.524 \times 10^{-4}$	1.60	3.15
K	$500\text{kHz} \leq f < 1.0\text{MHz}$	$8.147 \times 10^{-8}$	2.19	3.10
K	$f \geq 1.0\text{MHz}$	$1.465 \times 10^{-19}$	4.13	2.98
R	$f < 500\text{kHz}$	$5.597 \times 10^{-4}$	1.43	2.85
R	$500\text{kHz} \leq f < 500\text{kHz}$	$4.316 \times 10^{-5}$	1.64	2.68
R	$f \geq 500\text{kHz}$	$1.678 \times 10^{-6}$	1.84	2.28
P	$f < 100\text{kHz}$	$1.983 \times 10^{-3}$	1.36	2.86
P	$100\text{kHz} \leq f < 500\text{kHz}$	$4.885 \times 10^{-5}$	1.63	2.62
P	$f \geq 500\text{kHz}$	$2.068 \times 10^{-15}$	3.47	2.54
F	$f \leq 10\text{kHz}$	$7.698 \times 10^{-2}$	1.06	2.85
F	$10\text{kHz} < f < 100\text{kHz}$	$4.724 \times 10^{-5}$	1.72	2.66
F	$100\text{kHz} \leq f < 500\text{kHz}$	$5.983 \times 10^{-5}$	1.66	2.68
F	$f \geq 500\text{kHz}$	$1.173 \times 10^{-6}$	1.88	2.29
J	$f \leq 20\text{kHz}$	$1.091 \times 10^{-3}$	1.39	2.50
J	$f > 20\text{kHz}$	$1.658 \times 10^{-8}$	2.42	2.50
W	$f \leq 20\text{kHz}$	$4.194 \times 10^{-3}$	1.26	2.60
W	$f > 20\text{kHz}$	$3.638 \times 10^{-8}$	2.32	2.62
H	$f \leq 20\text{kHz}$	$1.698 \times 10^{-4}$	1.50	2.25
H	$f > 20\text{kHz}$	$5.3720 \times 10^{-5}$	1.62	2.15

表 2-15 铁粉末磁心的磁心损失系数

微金属公司 (Micrometals) 的铁粉末磁心					
材料	磁导率 $\mu$	系数 $a$	系数 $b$	系数 $c$	系数 $d$
Mix-80	35	0.01235	0.8202	1.4694	$3.85 \times 10^{-7}$
Mix-18	55	0.00528	0.7079	1.4921	$4.70 \times 10^{-7}$
Mix-26	75	0.00700	0.4858	3.3408	$2.71 \times 10^{-6}$
Mix-52	75	0.00700	0.4858	3.6925	$9.86 \times 10^{-7}$

## 磁性材料的选择

在航空航天和电子工业的功率处理应用领域，静止逆变器、变换器和变压器-整流器 (T-R) 电源中所用的变压器通常是由矩形回线钢带绕成环形。缺少描述在高频方波激励下普通常用的和较奇特磁心材料性状的工程数据，严重妨碍了上述应用中可靠、高效率和小质量器件的设计。

一个开发这些数据的计划已在 Jet Propulsion 实验室 (JPL) 完成。这些数据是由目前可从各种工业部门获得的带状磁心材料动态  $B-H$  回线特性测量中得到的。磁心被制成环形和 C 形，测试在无气隙 (未切割) 和有气隙 (经切割) 结构情况下进行，下面叙述其研究的结果。

## 典型的磁运行状态

在逆变器、变换器和变压器-整流器电源中所用的变压器，其工作由一个电源总线开始。这个总线可能是直流 (DC) 的，可能是交流 (AC) 的。在某些功率处理应用的场合，通常所用的电路是一个被驱动的晶体管开关，如图 2-25 所示。

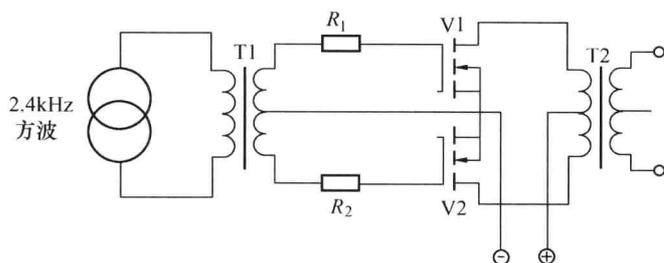


图 2-25 典型带被驱动功率 MOS 场效应管逆变器

影响所设计的变压器能否正常使用的一个重要考虑是它必须确保其工作中对变压器一次要有一个平衡的驱动。在不平衡的驱动中，变压器的一次将有净直流 (DC) 电流。这会使在相交替的半周期中容易饱和。饱和的磁心不能支撑外施电压，这个外施电压主要由其导通电阻来承担。结果所引起的大电流和变压器漏感一起在开关转换期间导致高的电压尖峰。这个高电压尖峰可以使功率 MOSFET 遭到破坏。为了提供出平衡的驱动，必须精确地使 MOSFET 的  $R_{DS(on)}$  相匹配。但是，这不总是充分有效的，实际上，精确地选配 MOSFET 也是一个主要的难题。

## 材料的特性

许多可买到的磁心材料都有接近如图 2-26 所示的理想  $B-H$  矩形曲线特性。几种通常可买到的典型磁心材料直流 (DC)  $B-H$  回线如图 2-27 所示。其他的特性见表 2-16。

关于逆变器和变换器中变压器的设计已经发表了很多文章。通常作者们的建议体现的都是对表 2-16 中所列出材料的特性之间或图 2-27 中所显示的特性之间的折中。这些数据是作为商品可以买到的且适合于个案应用的磁心材料典型数据。

正如我们可以看到的，提供最高饱和磁通密度的材料 (Supermendur——铁钴钒矩合金材料) 将导致最小的器件体积。如果体积是很重要的指标，这将影响设计者的选

择。铁氧体(参看图 2-27 中的铁氧体曲线)具有最低的饱和磁通密度, 这将导致体积最大的变压器。为变压器或电感器选择磁性材料不能只根据饱和磁通密度来选择, 还有另外的参数, 如频率和磁心结构也必须考虑。

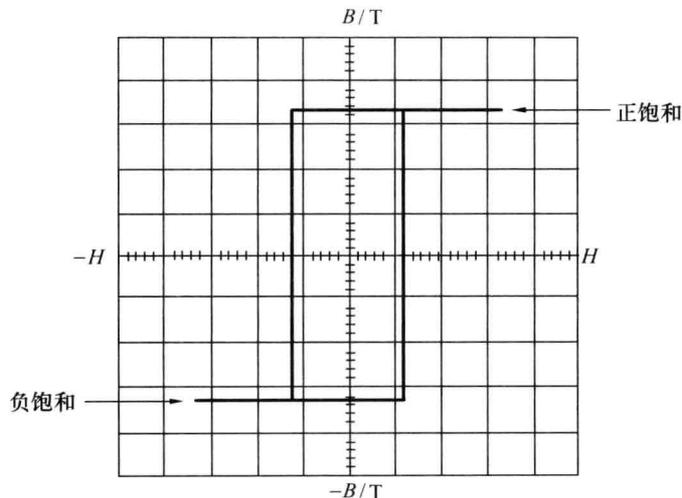


图 2-26 理想的矩形 B-H 回线

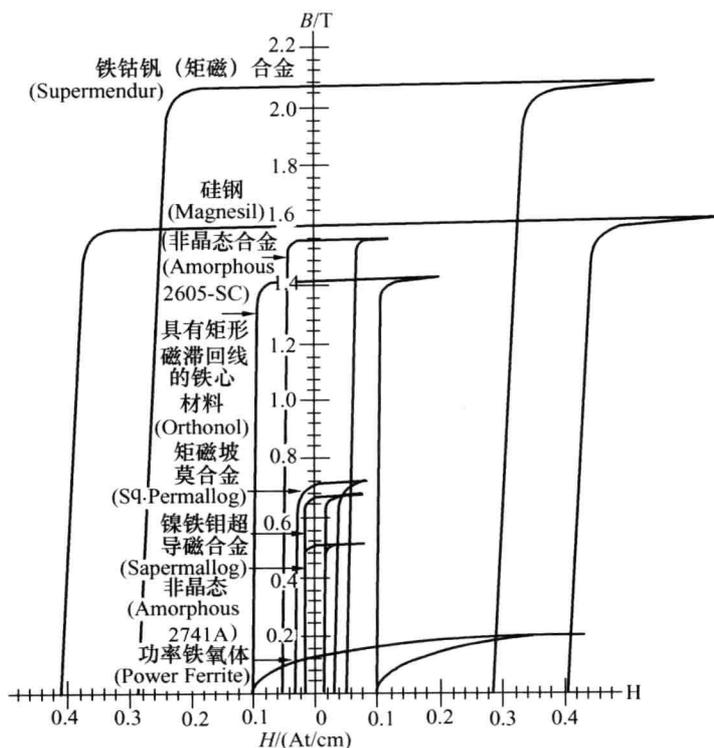


图 2-27 典型磁性材料的直流 (DC) B-H 回线

表 2-16 磁心材料特性

材料名称	成分	初始磁导率 $\mu_i$	磁通密度 $B_s/T$	居里温度 /°C	DC (直流) 矫顽力 $H_c$ /Oe	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )
硅钢 (Magnesil)	3%Si 97%Fe	1.5k	1.5~1.8	750	0.4~0.6	7.3
铁钴钒矩磁合金* (Supermendur)	49%Co 49%Fe 2%V	0.8k	1.9~2.2	940	0.15~0.35	8.15
具有矩形磁滞回线的磁心材料 (Orthonol)	50%Ni 50%Fe	2k	1.42~1.58	500	0.1~0.2	8.24
矩磁坡莫合金 (Sq. Permalloy)	79%Ni 17%Fe 4%Mo	12k~100k	0.66~0.82	460	0.02~0.04	8.73
镍铁钼超导磁合金 (Supermalloy)	78%Ni 17%Fe 5%Mo	10k~50k	0.65~0.82	460	0.003~ 0.008	8.76
非晶态 2605-SC (Amorphous 2605-SC)	81%Fe 13.5%B 3.5%Fe	3k	1.5~1.6	370	0.03~0.08	7.32
非晶态 2714A (Amorphous 2714A)	66%Co 15%Si 4%Fe	20k	0.5~0.58	205	0.008~0.02	7.59
铁氧体 (Ferrite)	MnZn	0.75~15k	0.3~0.5	100~300	0.04~0.25	4.8

\* 磁场中退火。

通常，逆变器中变压器的设计目标是最小的体积、最高的效率和在最宽广的环境条件下满足要求的性能。遗憾的是，能够产生最小体积的磁心材料具有最低的效率，而最高效率的材料导致的是最大的尺寸。这样，变压器设计者必须在允许的变压器尺寸和能够允许的最低效率之间进行折中。那么，磁心材料的选择将建立在使最关键的或最主要的参数方面获得最好的特性和在其他参数方面也获得可接受特性折中的基础之上。

在分析了大量的设计以后看出，多数工程师选择了尺寸而不是效率作为最重要的准则，同时，为他们的变压器磁心材料选择一个中等的损失系数。因此，当频率增加时，铁氧体就成为最常用的材料了。

## 磁性材料饱和的定义

为了使饱和的定义标准化，我们定义  $B-H$  回线上的几个特殊点，如图 2-28 所示。

通过  $(H_0, 0)$  和  $(H_s, B_s)$  的直线可以写为

$$B = \frac{\Delta B}{\Delta H}(H - H_0) \quad (2-4)$$

通过  $(0, B_2)$  和  $(H_s, B_s)$  的直线斜率基本上为零，可以写为

$$B = B_2 \approx B_s \quad (2-5)$$

式 (2-1)<sup>①</sup> 和式 (2-2)<sup>②</sup> 联立定义了如下的饱和条件

$$B_s = \frac{\Delta B}{\Delta H}(H_s - H_0) \quad (2-6)$$

解式 (2-3)<sup>③</sup> 求  $H_s$ ，得

$$H_s = H_0 + \frac{B_s}{\mu_0} \quad (2-7)$$

式中用到了定义

$$\mu_0 = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (2-8)$$

我们定义，饱和发生在当励磁电流的峰值  $(B)$  为励磁电流平均值  $(A)$ <sup>④</sup> 的两倍时，如图 2-29 中所示。用解析式表示即是

$$H_{pk} = 2H_s \quad (2-9)$$

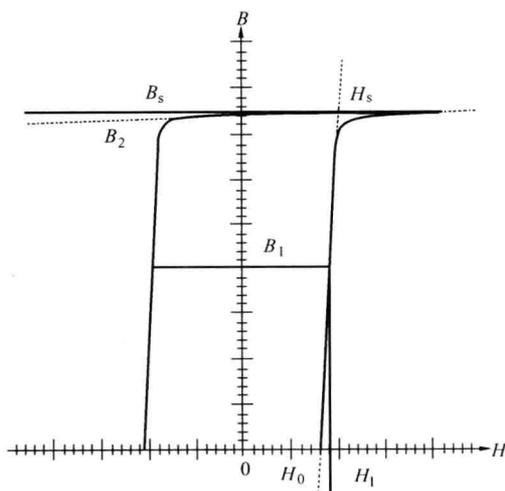
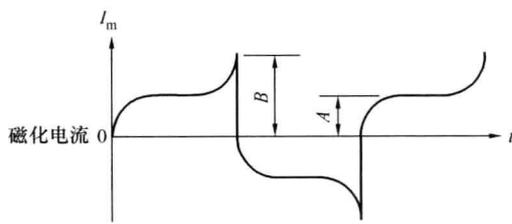


图 2-28 定义 B-H 回线



按定义,饱和发生在当 $B=2A$ 时

图 2-29 定义饱和时的励磁电流

- ① 原文有误，应为式 (2-4)。
- ② 原文有误，应为式 (2-5)。
- ③ 原文有误，应为式 (2-6)。
- ④ 原文如此，但与图 2-29 不符，图 2-29 中的 A 不是电流的平均值，它是近似地与磁心材料  $H_c$  相对应的电

流值  $I_c = \frac{H_c l_c}{N}$ 。而从图中看，励磁电流的平均值是零。图 2-29 是励磁线圈在对称的电压作用下，当电压幅值较大使磁心进入饱和时，励磁电流的波形。用此图定义磁心饱和是可以的，A 可以近似看作是励磁电流的“均绝值”。即此励磁电流绝对值的平均值。

解式(2-4)求  $H_1$ ，我们得到<sup>❶</sup>

$$H_1 = H_0 + \frac{B_1}{\mu_0} \quad (2-10)$$

为了得到饱和直流裕度 ( $\Delta H$ )，我们从式(2-7)减去式(2-10)为

$$\Delta H = H_s - H_1 = \frac{B_s - B_1}{\mu_0} \quad (2-11)$$

实际不平衡直流(DC)电流必须被限制到

$$I_{DC} \leq \frac{\Delta H(MPL)}{N} \quad (A) \quad (2-12)$$

式中： $N$ 为匝数； $MPL$ 为平均磁路长度。

式(2-11)与式(2-12)联立给出

$$I_{dc} \leq \frac{(B_s - B_1)(MPL)}{\mu_0 N} \quad (A) \quad (2-13)$$

正像前面提到的，为了防止磁心饱和，对开关功率 MOSFET 的驱动必须是对称的，并且功率 MOSFET 的导通电阻也必须是配对的。采用无切割即无气隙的磁心时磁心饱和的效果如图 2-30 所示，该图说明直流偏置对  $B-H$  回线移动的影响。图 2-31 示出了一组由交流电源激励且激励是逐渐减小的，50-50 镍-铁材料的典型  $B-H$  回线。其纵轴尺度为  $0.4T/cm$ 。人们可能注意到，在减小了激励以后，较小的那个回线维持在基本  $B-H$  回线的某一端位置，这个随机的小磁滞回线位置是令人遗憾的，后果是：当变压器的线圈断电后重新导通时，磁通的变化可能从某个端点而不是从通常的零坐标开始。其后果是使磁心进入饱和，产生尖峰电流，可能破坏晶体管。

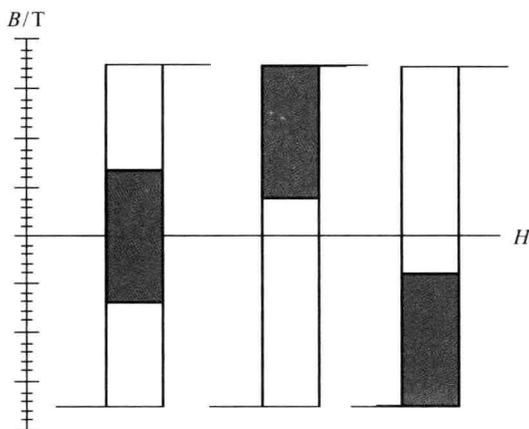


图 2-30 具有直流偏磁的  $B-H$  回线

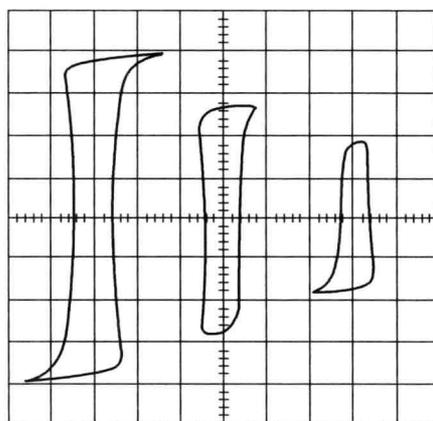


图 2-31 典型的矩磁材料的具有直流偏磁的矩磁回线

<sup>❶</sup>  $H_1$  是什么？由图 2-28 可知， $H_1$  与  $B_1$  相对应。 $B_1$  是什么？ $B_1$  表示当磁心线圈被交流平衡激励时，磁感应强度变化的幅值。

## 有关此电子图书的说明

本人由于一些便利条件，可以帮您提供各种中文电子图书资料，且质量均为清晰的PDF图片格式，质量要高于网上大量传播的一些超星 PDG 的图书。方便阅读和携带。只要图书不是太新，文学、法律、计算机、人文、经济、医学、工业、学术等方面的图书，我都可以帮您找到电子版本。所以，当你想要看什么图书时，可以联系我。我的 QQ是：**89039855**，大家可以在 QQ上联系我。

此 PDF 文件为本人亲自制作，请各位爱书之人尊重个人劳动，敬请您不要修改此 PDF文件。因为这些图书都是有版权的，请各位怜惜电子图书资源，不要随意传播，否则，这些资源更难以得到。