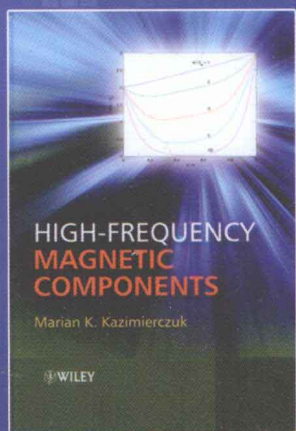


国外电子与通信教材系列



高频磁性器件

High-Frequency Magnetic Components



[美] Marian K. Kazimierczuk 著

钟智勇 唐晓莉 张怀武 译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子与通信教材系列

高频磁性器件

High-Frequency Magnetic Components

[美] Marian K. Kazimierczuk 著

钟智勇 唐晓莉 张怀武 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书是高频功率磁性器件领域的一本教材。全书共 11 章,首先完整介绍了磁性器件的基本概念与原理,然后详细介绍了高频时出现的趋肤效应与邻近效应,以及两效应对高频磁性器件的绕组和磁芯损耗的影响,最后采用案例学习方式,介绍了用面积积法和几何系数法设计变压器和电感器的实际设计范例、过程,在此过程中,注意采用学生易于理解的分析方式对实例进行以概念为主导的解释。

本书可作为电子工程专业高年级本科生和研究生的教材,也可作为功率电子和射频功率放大器领域工程师的参考书籍。

High-Frequency Magnetic Components

ISBN: 978-0-470-71453-9

Marian K. Kazimierczuk

Original English Edition Copyright©2009 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved.

This translation published under license.

Authorized Translation of the Edition published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the back cover are unauthorized and illegal.

本书中文简体版专有出版权由 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社。专有出版权受法律保护。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2010-0374

图书在版编目(CIP)数据

高频磁性器件/(美)卡齐梅尔恰克(Kazimierczuk, M. K.)著;钟智勇等译. —北京:电子工业出版社, 2012.3
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: High-Frequency Magnetic Components

ISBN 978-7-121-15887-2

I. ①高… II. ①卡… ②钟… III. ①高频-磁性器件-高等学校-教材 IV. ①TP211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 025030 号

策划编辑:冯小贝

责任编辑:周宏敏

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:25.25 字数:696 千字

印 次:2012 年 3 月第 1 次印刷

定 价:69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主 任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委 员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

译者序

磁性器件(变压器和电感器)是电路系统中必备的器件,特别是在电子设备的电源系统中。如在电路输入端和输出端采用滤波电感滤除开关谐波;在谐振电路中用电感与电容发生谐振以获得正弦的电压和电流;在缓冲电路中,用电感限制功率器件的电流变化率;在升压式变换器中存储和传输能量;在电路中使用变压器来电气隔离、电压或阻抗变换、产生相位移、用反激的形式存储和传输能量及进行电压和电流检测等。由于磁性器件设计时涉及诸多参数,如电压、电流、频率、温度、能量、电感、变比、漏感、材质、铜损及铁损等,所以绝大多数磁性器件要自行设计,而器件的设计优劣直接关系到电路的工作性能及电源的效率等参数,因此,电子工程专业的高年级本科生和研究生迫切需要一本关于高频功率磁性器件的教材,从事功率电子和射频功率放大器领域工作的工程师也需要参考相关的参考书籍。

美国俄亥俄州赖特州立大学电子工程系 Marian K. Kazimierczuk 教授在该校的高频磁性器件课程的讲义基础上编著了 *High-Frequency Magnetic Components*,该讲义已被每学期超过 100 名研究生试用过多年。本书主要涉及高频磁性器件(变压器和电感器)的分析与设计基础,书中有变压器和电感器的高频模型,特别是本书还详细讲述了趋肤效应和邻近效应对高频磁性器件的绕组和磁芯损耗的影响,变压器与电感器的自电容,也全面介绍了最近出现的集成电感器。更为重要的是,本书采用案例学习方式,详细介绍了用面积积法和几何系数法设计变压器和电感器的实际设计范例与过程。在每章末还提供了关键概念的总结,以及复习题和习题,可帮助读者巩固所学内容。

需要说明的是,本书中的变量、函数及符号均采用了英文原著的字体。

本书由电子科技大学钟智勇翻译,张怀武教授审阅了全部翻译稿。在翻译过程中,还得到了研究生汪学锋、陶龙旭和王棋的帮助,在此表示感谢。

由于译者的水平有限,书中肯定存在不足和疏漏之处,敬请读者批评指正和谅解。

前 言

本书是面向电子工程专业的高年级学生和研究生的高频功率磁性器件(高频功率电感和高频功率变压器)教材,也可作为功率电子和射频功率放大器领域工程师的参考书籍。本书旨在提供分析与设计高频功率磁性器件的基本原理。本书论述了高频时趋肤及邻近效应对磁性器件的绕组和磁芯损耗的影响,同时研究了集成电感。对电感器与变压器中的寄生电容进行了分析,并给出了高频下电感器与变压器的基本物理模型。全书的物理量采用国际单位。

本书假定学生已有磁场及基本电路的分析能力。本书中所有习题的完整解答在求解手册给出,选择本书作为教材的教师可从出版商处获得该求解手册。

感谢 Nisha Kondrath 提供的 MATLAB 计算结果图,感谢 Dakshina Murthy Bellur 在设计电感和变压器开发实例时提供的帮助,感谢 Gregory Kozlowski 博士在贝塞尔函数及分析单圆导体中提供的帮助,感谢 Hiroo Sekiya 博士富有创造性的讨论。在本书写作的全部过程中,John Wiley & Sons 提供了很大的支持。诚挚地感谢出版商 Simone Taylor, *Engineering Technology* 的助理编辑 Laura Bell、项目编辑 Nicky Skinner 及内容编辑 Liz Benson。很高兴能与他们一起工作。最后,感谢我的家人,因为他们在本书完成过程中给予的耐心、理解和支持。

作者欢迎并感激读者为本书内容及表述方式的改进给出建议及指正。

Marian K. Kazimierczuk

作者简介

Marian K. Kazimierzuk 是美国俄亥俄州赖特州立大学电子工程 Robert J. Kegerreis 杰出教授。作者著书 6 部,发表期刊论文 130 余篇、会议论文 150 余篇,以及授权专利 7 项。他是 IEEE 的会员。2008 年获得美国工程教育协会 (ASEE) 授予的杰出教师奖。他的研究兴趣有功率电子,包括脉冲宽度调制的 DC-DC 功率变换,谐振 DC-DC 功率变换的建模及控制,射频功率放大器及振荡器,半导体功率器件,高频磁性器件,可再生能源,以及微波成像。

符 号 表

A	磁矢量势	f_s	开关频率
A_c	磁芯横截面积	f_H	上限 3dB 截止频率
A_{Cu}	铜横截面积	f_L	下限 3dB 截止频率
A_L	磁芯的特定电感, 电感因数	F_f	边缘因子
A_w	绕组裸线的横截面积	F_g	空气间隙因子
A_{wo}	绕组线外横截面积	F_R	交流电阻因子
A_{ws}	裸绞合线横截面积	F_{Rh}	谐波交流电阻因子
A_{wso}	胶合线外横截面积	F_{Rph}	初级线圈的谐波交流电阻因子
A_p	磁芯的面积乘积	F_{Rsh}	次级线圈的谐波交流电阻因子
A_t	电感或者变压器的表面积	h	绕组导体的厚度
b	绕组的宽度	H	磁场强度
b_{wf}	箔式绕组宽度	H_c	矫顽力
B	磁通密度	i	电流
B_{DC}	磁感应强度中的直流分量	i_p	通过初级线圈的电流
B_m	磁感应强度直流分量幅值	i_s	通过次级线圈的电流
B_r	剩余磁通密度	i_L	通过电感器的电流
B_{pk}	总磁通密度峰值 ($B_{pk} = B_{DC} + B_m$)	i_{LM}	通过磁化电感的电流
B_s	饱和磁化强度	I_n	电感器电流的第 n 次谐波 RMS (均方根) 值
BW	带宽	I_{rms}	电流 i 的 RMS 值
C	电容	I_I	转换器直流输入电流
C_s	等效串联谐振电容	I_L	通过电感器 L 的平均或直流电流
d_i	绕组裸线直径	I_{Lmax}	通过电感器 L 的最大电流
d_o	绝缘绕组线外直径	I_{Lrms}	通过电感器 L 的 RMS 值
d_s	裸胶合线直径	I_{Lpk}	通过电感器 L 的总电流峰值
d_{so}	绝缘胶合线外直径	I_o	转换器的直流输出电流
D	转换占空比的直流分量	I_{Omax}	直流负载电流 I_o 的最大值
D_{min}	转换占空比的最小直流分量	I_{Omin}	直流负载电流 I_o 的最小值
D_{max}	转换占空比的最大直流分量	J	电流密度
D_i	环状磁芯的内直径	J_m	电流密度幅值
D_o	环状磁芯的外直径	J_{rms}	电流密度的 RMS 值
D_w	驻留占空比	k	耦合系数
f	频率	K_a	空气因子
f_r	电感的自谐振频率		

K_{ai}	空气盒线绝缘因子	P_O	转化器或者放大器的输出功率
K_{ed}	边缘因子	P_t	总的视在功率
K_g	磁芯几何系数	Q	品质因数
K_b	线轴因子	Q_{Lo}	电感的品质因数
K_f	波形因子	Q_L	谐振电流在谐振频率 f_0 处的有载品质因数
K_i	线绝缘因子	r_L	电感器的等效串联电阻
K_u	窗口利用因子	R	电阻
k	复传播常数	R_w	绕组电阻
l_c	磁路长度	R_{wdc}	绕组直流电阻
l_g	空气间隙长度	R_{wpdc}	初级线圈直流电阻
l_T	平均匝长	R_{wsdc}	胶合线次级线圈直流电阻
l_w	绕组线长	R_{wpdc}	胶合线初级线圈直流电阻
l_{wp}	初级线圈绕组线长	R_{wsdc}	次级线圈直流电阻
l_{ws}	次级线圈绕组线长	R_{cs}	磁芯串联等效电阻
L	电感	R_L	负载电阻
L_l	漏感	R_{Lmax}	最大负载电阻
L_m	变压器磁化电感	R_{Lmin}	最小负载电阻
m_o	轨道磁矩	S_n	胶合线数目
m_s	自旋磁矩	S_{np}	初级线圈中的胶合线数目
M	互感	S_{ns}	次级线圈中的胶合线数目
M_{VDC}	转换器的直流电压传输函数	T	转换周期
n	变压器初级线圈与次级线圈匝数比	T_c	居里温度
N	匝数	v	电压
N_l	层数	v_L	电感 L 两端电压
N_{lp}	初级线圈层数	v_o	输出电压中的交流成分
N_{ls}	次级线圈层数	V_c	磁芯体积
N_p	初级线圈匝数	V_{rms}	电压 v 的RMS值
N_s	次级线圈的匝数	W_a	磁芯的窗口面积
P_C	磁芯损耗	W_{ap}	初级线圈的磁芯窗口面积
P_{cw}	磁芯和绕组功率损耗	W_{as}	次级线圈的磁芯窗口面积
P_w	绕组功率损耗	W_b	线轴横截面积
P_{wp}	初级线圈功率损耗	W_m	存储在电感或者变压器中的磁能
P_{ws}	次级线圈功率损耗	x	串联电抗
P_{wdc}	绕组直流功率损耗	X	并联电抗
P_{wpdc}	初级线圈直流功率损耗	$\mathcal{P}$	磁导
P_{wsdc}	次级线圈直流功率损耗	$\mathcal{R}$	磁阻
P_{wpdcs}	胶合线初级线圈直流功率损耗	α	变压器的变动率
P_{wsdcs}	胶合线次级线圈直流功率损耗	γ	复传播常数
P_v	单位体积内的磁芯损耗	Δi_L	电感器浮动电流的峰-峰值

ΔT	温升	μ_{rc}	磁芯相对磁导率
δ	趋肤深度	ϕ	磁通量
δ_c	磁芯趋肤深度	ϕ_n	电感器电流第 n 次谐波相位角
δ_w	绕组导体的趋肤深度	ξ	电压利用因子
δ_{wn}	绕组导体中第 n 次谐波的趋肤深度	ρ	电阻率
λ	磁链	ρ_c	磁芯材料的电阻率
ε_0	真空介电常数	ρ_{Cu}	铜电阻率
ε_r	相对介电常数	ρ_w	绕组导体电阻率
η	效率, 导体的间距系数	σ	传导性
η_i	变压器的效率	ψ	表面功率密度
μ	磁导率	ω	角频率
μ_0	真空磁导率	ω_r	自谐振角频率
μ_r	相对磁导率		

目 录

第 1 章 磁性器件基础	1
1.1 引言	1
1.2 磁场物理量的关系	1
1.2.1 磁动势	1
1.2.2 磁场强度	1
1.2.3 磁通	2
1.2.4 磁通密度	2
1.2.5 磁链	3
1.3 磁路	3
1.3.1 磁阻	3
1.3.2 磁基尔霍夫电压定律	4
1.3.3 磁通连续性定律	5
1.4 磁性定律	5
1.4.1 安培定律	5
1.4.2 法拉第定律	7
1.4.3 楞次定律	8
1.4.4 欧姆定律	8
1.4.5 麦克斯韦方程组	8
1.4.6 良导体的麦克斯韦方程组	9
1.4.7 坡印廷矢量	10
1.4.8 焦耳定律	11
1.5 涡流	13
1.6 磁芯饱和	14
1.6.1 正弦波电压作用下的电感器磁芯饱和	15
1.6.2 方波电压作用下的电感器磁芯饱和	16
1.6.3 矩形波电压作用下的电感器磁芯饱和	17
1.7 伏-秒平衡原则	19
1.8 电感	20
1.8.1 电感的定义	20
1.8.2 螺线管的电感	22
1.8.3 环形磁芯电感器的电感	23
1.8.4 罐形磁芯电感器的电感	24
1.8.5 气隙	25
1.8.6 边缘磁通	27
1.8.7 带状传输线电感	30
1.8.8 同轴电缆电感	30
1.8.9 平行双导传输线电感	31

1.9	电感系数	31
1.10	磁场能量	32
1.11	自谐振频率	33
1.12	磁性器件的功耗分类	34
1.13	非感应线圈	34
1.14	总结	34
1.15	参考文献	35
1.16	复习题	36
1.17	习题	37
第2章	磁芯	39
2.1	引言	39
2.2	磁芯材料的性能	39
2.3	磁偶极子	40
2.4	磁畴	42
2.5	居里温度	43
2.6	磁化强度	43
2.7	磁性材料	44
2.7.1	铁磁性材料	44
2.7.2	反铁磁性材料	45
2.7.3	亚铁磁性材料	45
2.7.4	抗铁磁性材料	45
2.7.5	顺磁性材料	46
2.8	磁滞	46
2.9	磁芯的磁导率	47
2.10	磁芯的几何形状	47
2.11	铁合金磁芯	50
2.12	非晶态合金磁芯	50
2.13	镍铁和钴铁磁芯	50
2.14	铁氧体磁芯	51
2.15	磁粉芯	52
2.16	纳米晶磁芯	53
2.17	超导体	53
2.18	磁芯的磁滞损耗	54
2.19	磁芯的涡流损耗	55
2.20	磁芯的总损耗	57
2.20.1	正弦电流作用的电感器的总损耗	57
2.20.2	磁芯的等效串联电阻	60
2.20.3	非正弦电流作用下的电感器磁芯损耗	61
2.20.4	磁芯的冷却	61
2.21	复数磁导率	62
2.21.1	磁芯的串联复数磁导率	62

2.21.2 磁芯的并联复数磁导率	64
2.22 总结	65
2.23 参考文献	67
2.24 复习题	69
2.25 习题	70
第3章 趋肤效应	71
3.1 引言	71
3.2 趋肤深度	71
3.3 绕组的交、直流电阻比	76
3.4 单根长圆导体的趋肤效应	76
3.5 单根圆导体的电流密度	77
3.5.1 贝塞尔微分方程	77
3.5.2 电流密度 $J(r)/J(0)$	78
3.5.3 电流密度 $J(r)/J(r_0)$	80
3.5.4 电流密度 $J(r)/J_d$	80
3.5.5 圆导体的近似电流密度	83
3.6 圆导体的阻抗	84
3.6.1 电阻和电感的准确表达式	84
3.6.2 圆导体的近似电阻与电感	88
3.6.3 圆导体电阻的简化推导	89
3.7 圆导体的磁场强度	89
3.8 求解圆导线电感的其他方法	92
3.9 圆导体的功率密度	96
3.10 矩形导体的趋肤效应	99
3.10.1 矩形导体的磁场	99
3.10.2 矩形导体的电流密度	101
3.10.3 矩形导体的功耗	104
3.10.4 矩形导体的阻抗	105
3.11 总结	109
3.12 参考文献	109
3.13 复习题	111
3.14 习题	111
第4章 邻近效应	112
4.1 引言	112
4.1.1 两平行圆导体间的邻近效应	112
4.1.2 同轴电缆的邻近效应	113
4.2 通反向电流的两平行板间的趋肤和邻近效应	114
4.2.1 两平行板间的磁场	114
4.2.2 两平行板间的电流密度	116
4.2.3 两平行板的功耗	120
4.2.4 每个导电板的阻抗	124

4.3	通同向电流的两平行板间的反邻近效应和趋肤效应	126
4.3.1	两平行板间的磁场	126
4.3.2	两平行板的电流密度	127
4.3.3	两平行板的功耗	128
4.4	多层绕组电感的邻近效应	129
4.5	总结	134
4.6	附录:邻近效应功耗的推导	135
4.7	参考文献	135
4.8	复习题	137
4.9	习题	137
第5章	高频绕阻	138
5.1	引言	138
5.2	绕阻	138
5.2.1	多层箔片电感器中的磁场强度和电流密度	138
5.2.2	绕组的功率损耗	145
5.2.3	Dowell 方程	148
5.2.4	Dowell 方程的近似解	149
5.3	方形和圆形导体	151
5.4	矩形导体绕组的电阻	153
5.4.1	普适方程	153
5.4.2	矩形导体的最佳高度	154
5.5	方形导线绕组的电阻	157
5.5.1	普适方程	157
5.5.2	方形导体的最佳高度	158
5.6	圆形导线绕组的电阻	160
5.6.1	普适方程	160
5.6.2	圆形导线的最佳直径	162
5.7	漏电感	164
5.8	在柱坐标中对圆形导线绕组的求解	165
5.9	利兹线	166
5.10	谐波电流下电感器绕组的能量损耗	167
5.10.1	连续导电模式下 PWM 直流 - 直流功率转化器中铜导线的损耗	169
5.10.2	非连续导电模式下 PWM 直流 - 直流功率转化器中铜导线的功率损耗	173
5.11	非正弦电流作用时绕组的有效电阻	175
5.12	电感器的热模型	176
5.13	总结	177
5.14	参考文献	178
5.15	思考题	180
5.16	习题	180
第6章	叠片磁芯	181
6.1	引言	181

6.2	低频解	181
6.3	通用解	183
6.3.1	高频磁场分布	183
6.3.2	高频功耗密度分布	186
6.3.3	高频时叠片的阻抗	190
6.4	总结	196
6.5	参考文献	196
6.6	复习题	198
6.7	习题	198
第7章	变压器	199
7.1	引言	199
7.2	理想变压器	199
7.3	变压器中的电压极性和电流方向	201
7.4	非理想变压器	202
7.5	互感的黎曼(Neumann)公式	205
7.6	互感	206
7.7	耦合系数	207
7.8	同名端法则	209
7.9	耦合电感的顺接与反接串联	211
7.10	反射阻抗	212
7.11	耦合电感的存储能量	212
7.12	磁化电感	213
7.13	漏感	214
7.14	具有气隙的变压器	215
7.15	自耦变压器	215
7.16	变压器电感的测量	216
7.17	寄生电容	217
7.18	高频变压器模型	218
7.19	非交错绕组	218
7.20	交错绕组	219
7.21	交流电流变压器	220
7.21.1	工作原理	220
7.21.2	电流变压器模型	221
7.21.3	低频响应	221
7.21.4	高频响应	222
7.22	绕组的谐波功耗	225
7.22.1	连续导通模式(CCM)下绕组的谐波功耗	225
7.22.2	非连续导通模式(DCM)下绕组的谐波功耗	227
7.23	变压器的热模型	230
7.24	总结	231
7.25	参考文献	232