

变压器与电感器 设计手册 (第三版)

[美] COLONEL WM. T. MCLYMAN

龚绍文 译



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

变压器与电感器 设计手册

(第三版)

[美] COLONEL WM. T. MCLYMAN

龚绍文 译



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TRANSFORMER AND INDUCTOR DESIGN HANDBOOK 3rd Edition/by COLONEL WM. T. MCLYMAN/ISBN: 0-8247-5393-3

Copyright © 2004 by Marcel Dekker, 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3版/(美)麦克莱曼(McLyman, C. W. T.)著; 龚绍文译. —北京: 中国电力出版社, 2008

书名原文: Transformer and Inductor Design Handbook
ISBN 978-7-5083-7707-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 108949 号
北京市版权局著作权合同登记号: 01-2007-3567

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009年1月第一版 2009年1月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 28.75印张 622千字
印数 0001—3000册 定价 88.00元

敬告读者

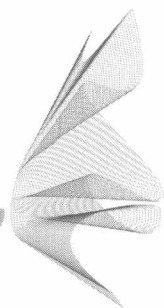
本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

献给我的妻子 *Bonnie*



译者的话



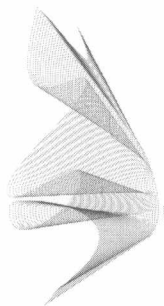
从事电力电子电路与系统设计、制造、测试、研究的工程师、研究者、教师和学生非常需要一些有关磁学、磁路、磁元件、磁器件的原理、分析与设计方面的书，特别是实用性很强的书，而这类书国内尚显不足。当中国电力出版社的同志拿来 [美] Colonel Wm. T. McLyman 先生著《Transformer and Inductor Design Handbook》，Third Edition, Revised and Expanded 要求我翻译成中文的时候，我虽然深知自己无论是英文水平还是专业水平都不足以把它翻释好，但我还是接受了，因为这确是一本目前国内同行十分需要且实用性很强的好书。我愿意把它介绍给国内的读者，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。联系方式是：北京理工大学信息科学技术学院（100081）或 Shaowengong@126.com。



序

FOREWORD

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。

在这本书中，Colonel McLyman 整合并订正了他以往著作中所得到的成果，还增加了几个新的题目，如旋转式变压器设计、平面变压器设计和平面磁心结构。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。

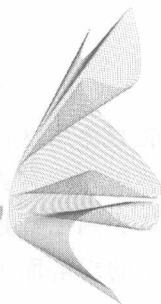
这本书是从事磁路设计工作工程师的必读之作。不论你从事的是高可靠的现代设计，还是大批量生产的低成本产品，这本书都是必不可少的。感谢 Colonel 给我们写了一本很好且有用的书。

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《变压器和电感器设计手册》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 21 章。它带有新的题目，如正激变换器、反激变换器、静音变换器、旋转式变压器和平面变压器，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^①、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_a 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_a 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。

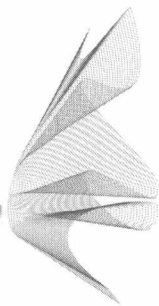
设计师们已经用过很多方法以达到合适的变压器和电感器设计，例如在很多情况下，用安排电流密度的经验法，在 1000 圆密耳/安等级的情况下就能得到很好的结果。这在很多时候是令人满意的。但是，满足这个要求计算出要用的导线尺寸可能要产生一个所希望的或真正要求的，又大又重的电感器。本书中给出的资料将可

^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人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。

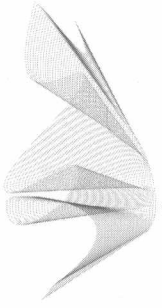
感 谢



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.

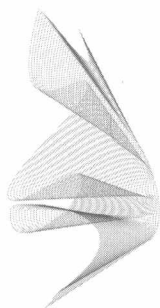
www.kgmagnetics.com; colonel@kgmagnetics.com

符 号

α	调整率, %	D_x	休止时间占空比
A_c	磁心的有效截面积, cm^2	E	电压
A_p	面积积, cm^4	E_{line}	线间电压(线电压)
A_t	变压器的表面面积, cm^2	E_{phase}	相线对中性线的电压(相电压)
A_w	导线面积, cm^2	W	能量, J
$A_{w(B)}$	裸导线面积, cm^2	ESR	等效串联电阻, Ω
$A_{w(D)}$	带绝缘的导线面积, cm^2	η	效率
A_{wp}	一次(旧称初级、原边)绕组导线面积, cm^2	f	频率, Hz
A_{ws}	二次(旧称次级、副边)绕组导线面积, cm^2	F	边缘磁通系数
A-T	安匝	F_m	磁动势, 即 mmf, A-T
AWG	美国线规(美国导线规格尺寸)	$F.L.$	满载
B	磁通密度或磁感应强度, T	G	绕组长度, cm
B_{AC}	交流磁通密度, T	γ	密度, g/cm^2
ΔB	磁通密度的变化量, T	ϵ	趋肤深度, cm
B_{DC}	直流磁通密度, T	H	磁场强度, Oe
B_m	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
B_{max}	最大磁通密度, T	ΔH	磁场强度变化量, Oe
B_c	工作磁通密度峰值, T	H_o	工作磁场强度的峰值, Oe
B_{pk}	磁通密度峰值, T	H_s	饱和处的磁场强度, Oe
B_r	剩余磁通密度, T	I	电流, A
B_s	饱和磁通密度, T	I_c	充电电流, A
C	电容	ΔI	电流变化量, A
C_n	新电容	I_{DC}	直流(DC)电流, A
C_p	集总参数电容	I_{in}	输入电流, A
CM	圆密耳	I_{Line}	输入线电流, A
D_{AWG}	导线直径, cm	I_{phase}	输入相电流, A
$D_{(\text{min})}$	最小占空比	I_m	磁化电流, A
$D_{(\text{max})}$	最大占空比	I_o	负载电流, A
		$I_{o(\text{max})}$	最大负载电流, A

$I_{o(\min)}$	最小负载电流, A	μ_0	空气磁导率
I_p	一次电流, A	μ_r	相对磁导率
I_s	二次电流, A	μ_e	等效磁导率
$I_{s(\text{phase})}$	二次相电流, A	n	匝比
$I_{s(\text{line})}$	二次线电流, A	N	匝数
J	电流密度, A/cm ²	N. L.	无载
K_c	铜损常数	N_L	电感匝数
K_c	准电压波形系数	N_n	新匝数
K_e	电系数	N_p	一次匝数
K_f	波形系数	N_s	二次匝数
K_g	磁心几何常数, cm ⁵	P	功率, W
K_j	与电流密度相关的常数	P_{Cu}	铜损, W
K_s	与表面面积相关的常数	P_{Fe}	磁心损耗或铁损, W
K_u	窗口利用系数	P_g	气隙损耗, W
K_{up}	一次窗口利用系数	Φ	磁通, Wb
K_{us}	二次窗口利用系数	P_{in}	输入功率, W
K_{vol}	与体积相关的常数	P_L	电感器的铜损, W
K_w	与质量相关的常数	P_o	输出功率, W
L	电感, H	P_p	一次铜损, W
L_c	开路电感, H	P_s	二次铜损, W
L_p	一次电感, H	P_Σ	总损耗(磁心和铜), W
l	线(长度)尺寸	P_t	总视在功率, VA
$L_{(crit)}$	临界电感	P_{VA}	一次伏-安(一次侧视在功率), VA
λ	密度, g/cm ³	R	电阻, Ω
l_g	气隙, cm	R_{AC}	交流电阻(AC电阻), Ω
l_m	磁材料部分路径长度, cm	R_{Cu}	铜的电阻, Ω
l_t	磁路路径总长度, cm	R_{DC}	直流(DC)电阻, Ω
mks	米-千克-秒	R_e	体现磁心损失的等效电阻(与电感并联), Ω
MLT	平均匝长, cm	R_g	气隙的磁阻, 1/H
mmf	磁动势, 即 Fm, A-T	R_m	磁心磁阻, 1/H
MPL	磁路长度, cm	R_{mt}	总磁阻, 1/H
mW/g	毫瓦/克	R_o	负载电阻, Ω
μ	磁导率	$R_{o(R)}$	反射的负载电阻, Ω
μ_i	初始磁导率	$R_{in(equiv)}$	反射的负载电阻, Ω
μ_Δ	增量磁导率		
μ_m	磁心材料磁导率		

R_p	一次侧绕组电阻, Ω	V_{in}	输入电压, V
R_R	交流/直流电阻比(AC/DC 电阻比)	$V_{in(max)}$	最大输入电压, V
R_s	二次侧绕组电阻, Ω	$V_{in(min)}$	最小输入电压, V
R_t	总电阻, Ω	V_n	新电压, V
ρ	电阻率, $\Omega\text{-cm}$	V_o	输出电压, V
S_1	导体面积/导线面积	V_p	一次电压, V
S_2	已绕制导线的面积/可利用的窗口面积	$V_{p(rms)}$	一次 rms(方均根)电压, V
S_3	可利用的窗口面积/窗口面积	$V_{s(LL)}$	二次线电压, V
S_4	可利用的窗口面积/可利用的窗口面积+绝缘面积	$V_{s(LN)}$	二次相线到中性线的电压, V
S_{np}	一次导线股数	$V_{r(pk)}$	纹波电压峰值, V
S_{ns}	二次导线股数	V_s	二次电压, V
S_{VA}	二次侧伏-安(二次侧视在功率)	ΔV_{CC}	电容器电压, V
T	总周期, s	ΔV_{CR}	电容器的串联电阻的电压, V
t_{off}	截止时间, s	ΔV_p	一次电压变化量, V
t_{on}	导通时间, s	ΔV_s	二次电压变化量, V
t_w	休止时间, s	W	瓦特(Watts)
T_r	温升, $^{\circ}\text{C}$	W/kg	瓦/千克
U	乘数因子	W_a	窗口面积, cm^2
VA	伏-安	W_{ap}	一次窗口面积, cm^2
V_{AC}	外施电压, V	W_{as}	二次窗口面积, cm^2
V_c	控制电压, V	$W_{a(eff)}$	有效窗口面积, cm^2
$V_{c(pk)}$	电压峰值, V	W-s	瓦-秒
V_d	二极管电压降, V	W_t	质量, g
		W_{tCu}	铜质量, g
		W_{tFe}	铁(磁心)质量, g
		X_L	电感电抗, Ω



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
索引		441

第1章

磁 学 基 础

Chapter 1

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 (μ_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：

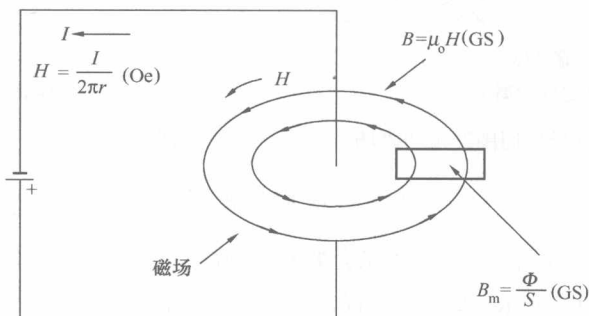


图 1-1 载流导体产生的磁场

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

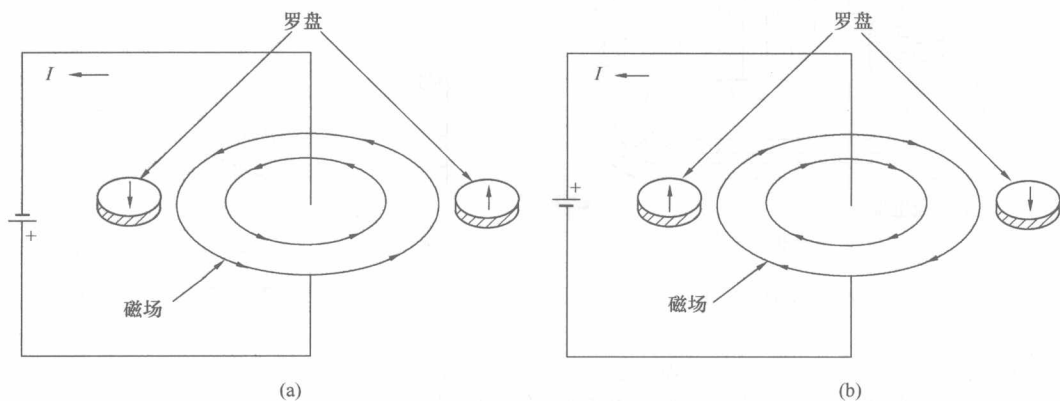


图 1-2 罗盘表明磁场怎样改变极性