



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

应用于电力电子技术的 变压器和电感 ——理论、设计与应用

TRANSFORMERS AND INDUCTORS FOR POWER
ELECTRONICS: THEORY, DESIGN AND APPLICATIONS

(爱尔兰) W. G. Hurley

(德国) W. H. Wölfle

朱春波 徐德鸿 张龙龙 张俊

著
译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

应用于电力电子技术的变压器 和电感——理论、设计与应用

(爱尔兰) W. G. Hurley (德国) W. H. Wölfle 著
朱春波 徐德鸿 张龙龙 张俊 译



机械工业出版社

Copyright © 2014 John Wiley & Sons, Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled < Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications >, ISBN: 978 - 1 - 119 - 95057 - 8, by W. G. Hurley and W. H. Wölfle, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字: 图字 01 - 2013 - 2947 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

应用于电力电子技术的变压器和电感: 理论、设计与应用/ (爱尔兰) 赫利, (德) 沃尔夫著; 朱春波等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 9

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Transformers and inductors for power electronics; theory, design and applications

ISBN 978-7-111-47719-8

I. ①应… II. ①赫…②沃…③朱… III. ①电力电子技术②变压器③电感器 IV. ①TM1②TM4③TM55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 191869 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: 张俊红 责任编辑: 张俊红

版式设计: 霍永明 责任校对: 杜雨霏

封面设计: 马精明 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)

2014 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18.75 印张 · 363 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47719-8

定价: 88.00 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 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

本书基于电磁理论基础，简明扼要地讲述了电力电子应用领域变压器和电感器的设计原理，从理论与实践角度对应用于电流滤波、电磁能量存储、电路隔离、直流和交流升降压变换中的变压器与电感器作了细致分析。书中介绍了各种现代功率变换系统的应用，基于鲁棒设计方法提出了变压器和电感的严谨设计指导，并给出了实际应用中成功的经典案例作为设计实例。本书涵盖电力电子变换中磁性元件的基础知识，为电力电子领域的技术和研发人员以及高等院校有关专业学生进行特定变压器/电感器的设计提供了全面参考。对于电气工程和电气能源系统专业的高年级本科生和研究生，以及电源和电能变换系统的工程师而言，如果想要进一步提升自己在该领域的最新知识，那么这本书无疑是最佳选择。

作者简介



威廉姆·杰拉德·赫利 (William Gerard Hurley), 生于爱尔兰科克市。1974年毕业于爱尔兰国立科克大学电气工程专业, 获得工学学士学位; 1976年毕业于麻省理工学院电气工程专业, 获得工学硕士学位; 1988年毕业于爱尔兰国立高威大学, 获得博士学位; 2011年被爱尔兰国立大学授予工程学博士学位 (D. ENG)。

1977—1979年, 在加拿大霍尼韦尔控制公司工作; 1979—1983年, 在安大略省电力公司工作; 1983—1991年, 在爱尔兰利莫瑞克大学担任讲师; 1991年加入爱尔兰国立高威大学, 并工作至今; 1997—1998年, 曾为麻省理工学院访问教授; 现为爱尔兰国立高威大学电气工程专业教授, 同时担任该校电力电子研究中心主任。赫利 (Hurley) 教授应邀在墨西哥、日本、新加坡、西班牙、捷克、中国和美国等国家作磁元件方面的报告。

研究方向主要有高频磁性元器件、电能质量、新能源系统等, 并于2000年获得 IEEE Transaction on Power Electronics 期刊最佳论文奖。赫利 (Hurley) 教授是国际电气电子工程师学会会士 (IEEE Fellow)。曾担任国际电气电子工程师学会 (IEEE) 电力电子分会执委会委员和2000年电力电子专家会议 (PESC 2000) 大会主席。2013年, 获得美国电气与电子工程师协会 (IEEE) 电力电子分会授予的“米德布鲁克 (Middlebrook) 技术成就奖”。2014年, 获得 IEEE 授予的“2014—2015年度卓越讲座人 (Distinguished Lecture)”荣誉称号。



维尔纳·雨果·沃尔夫 (Werner Hugo Wölfle), 生于德国巴德舒森里德 (Bad Schussenried)。1981年毕业于德国斯图亚特大学, 获得硕士学位。2003年毕业于爱尔兰国立高威大学, 获得博士学位。

1982—1985年, 担任道尼尔股份有限公司 (Dornier Systems GmbH) 研发工程师, 开发航天器应用功率变换器。1986—1988年, 担任工业交流电源和

直流电源研发经理。自 1989 年起，担任位于爱尔兰韦克斯福德的康威泰科有限责任公司 (Convertec Ltd) 经理，该公司为特兰科功率集团公司 (TRACOPOWER Group) 分公司，并研发工业应用的高可靠功率变换器。他目前为爱尔兰国立高威大学兼职教授。

译者序

作为爱尔兰高威国立大学赫利 (W. G. Hurley) 教授的学生和朋友, 我们非常欣喜能够有机会把他的著作译成中文推荐给我国的读者, 本书中文版的翻译出版也可看作是我们师生情谊的一个美好见证。

译者中的朱春波、张龙龙、张俊分别在不同时期师从赫利教授, 成为他的博士后和博士生, 目前均在国内从事相关领域的专业技术研究工作。徐德鸿是赫利教授的朋友, 与赫利教授有着深厚的友谊与长期的学术交流。

赫利教授从事电力电子领域的研究几十年, 曾经作为大会主席主持过多次国际电力电子领域的学术年会, 是该领域的知名专家。尤其是在高频电力电子、高频电磁场领域, 赫利教授更是取得了很多成就, 在国际上有很高的学术声望。本书可以说是他多年学术造诣的典型代表, 也是其长期学术经验的一个总结。

另一位作者沃尔夫 (W. H. Wölfle) 博士也是赫利教授的学生, 他在做博士课题期间所从事的就是电力电子领域的研究工作。他还作为一个公司的负责人专门从事电源以及功率变换方面的产品研发工作, 在电力电子产品的工程化研发方面积累了丰富的经验。

变压器和电感是电力电子系统中的核心部件, 其设计得好坏直接影响到电力电子产品的可靠性、电磁兼容性、质量、体积和成本等。与系统中的其他元件如电阻、电容、开关器件、控制芯片不同的是, 很多系统或产品中的电感和变压器往往需要针对功能要求进行个性化的设计, 而无法选用市场上的通用产品。这就要求电力电子产品的设计者和开发人员必须对电感和变压器的特性有深入的理解。作者从理论入手, 深入浅出地讲解了电感和变压器的理论基础和设计方法, 并给出了实际应用中的成功案例, 以便读者可以更好地理解和应用。

此外, 为了忠实原书, 本书图片中的符号、图形均未按我国的标准进行严格统一, 特此说明。

这里要感谢在本书翻译过程中很多人付出的辛苦与汗水, 哈尔滨工业大学的博士研究生毛世通、张剑韬、郭尧、李阳、李振杰分别参与了

第一到第五章的翻译工作，浙江大学的杜成瑞、李海津、朱晔、王晔等同学参与了其他章节的翻译工作。在本书翻译、定稿和出版过程中，得到了机械工业出版社的大力支持，特别感谢机械工业出版社电工电子分社的张俊红副社长和吕潇编辑。正是由于他们的努力工作，才使本书得以顺利地翻译出版。

由于译者水平有限，书中难免有错误和翻译不当的地方，真诚地希望读者批评指正。

译 者

2014年9月25日

原 书 序

磁元件“体积太大、温升太高、价格太高”诸如此类的抱怨一直困扰着电感器和变压器的设计人员，并阻碍了电力电子技术的发展。由 Hurley 教授和 Wölfle 博士结合自身多年专业实践编写的这本书，虽然不能彻底解决这一困扰，但至少可以缓解当前的困境。

自从麻省理工学院研究生阶段在我指导下完成感应加热研究论文起，Ger Hurley 已经在磁元件的分析与设计领域从事研究、教学和写作长达 40 年。Werner Wölfle 具有丰富的工程经验，并从博士阶段起在 Hurley 教授的指导下从事磁元件的研究。因而从一定程度上来讲，我也从这本书中获益良多。

当前世界对电力电子的需求前所未有的，其应用已深入到普通民用市场，如太阳能光伏变换器、电动汽车或混合动力、智能化家居等产品，实现低成本、高效率的关键在于对产品内部价格较高的变压器和电感器进行优化设计。当涉足设计领域时，无须再去讨论电学中准静态场的理论问题，只需要解决效率提高与尺寸减小这一工程矛盾即可。此时，便需要这本书来做理论指导。

尽管当前已出版了许多用来指导工程师设计磁元件的书，但其仅给出了设计原则和公式，并未详细解释其物理意义。Hurley 和 Wölfle 虽然也在书中给出了一些设计原则和公式，但本书重点在于阐述这些设计原则和公式如何推导而来。随着磁元件中更高频率、新几何形状、新材料以及新生产工艺得以应用，再不能像以前一样可以直接找到合适的公式，然后在产品手册中选取一个罐形磁心、C 形磁心或 E 形磁心开始绕制。能否更好地理解电磁原理、磁元件的建模和分析对于能否成功设计磁元件至关重要，这也是 Hurley 和 Wölfle 在本书中极力传达的目的所在。

本书内容广泛，主题精心安排，涵盖电磁学基础、高频效应、非常规几何形状、损耗机理、测试等内容，并给出大量的应用实例。因此，

对于亟需设计磁元件的电力电子工程师来说，这是一本必备参考书，可以帮助其设计体积小、温升高、成本低的磁元件。Hurley 和 Wölfle 的这本书，注定可以与 Colonel 的著作[⊖]相媲美，必将成为书架上的经典。这一显著成就，值得称赞。

麻省理工学院电气工程专业教授
John G. Kassakian

⊖ McLyman, Colonel W. T. (1978) Transformer and Inductor Design Handbook. Marcel Dekker, Inc., New York.

原书致谢

感谢麻省理工学院 John Kassakian 教授多年来在磁元件研究上的支持，感谢爱尔兰国立高威大学过去和现在给予本书写作提供帮助的同事和学生。

特别感谢利莫瑞克大学的 Eugene Gath 博士在优化问题方面做出的数学分析工作，感谢爱尔兰国立丁达尔研究所 (Tyndall Institute) 的 Ningning Wang 博士和福尔特拉公司 (Volterra) 的 Jian Liu 博士在平面磁性材料上的帮助。

特别感谢我的博士研究生 Maeve Duffy 博士和 John Breslin 博士为本书提供了许多思路，他们的博士论文构成了本书的基础。

感谢爱尔兰企业集团 (Enterprise Ireland) 的 Joe Madden、内布拉斯加—林肯大学的 Dean Patterson 教授、中国香港大学的 Ron Hui 教授、麻省理工学院的 Dave Perreault 教授、达特茅斯学院的 Charles Sullivan 教授、爱尔兰国立科克大学的 Arthur Kelley 博士和 Cianó Mathúna 教授，许多想法来自于同他们的讨论。

感谢爱尔兰国立科克海事学院的 Noel Barry 博士、丹麦科技大学的 Ziwei Ouyang 博士、中国香港大学的 Kwan Lee 博士、爱尔兰国立高威大学的 Jun Zhang 审阅了本书初稿。感谢中国浙江大学的 Longlong Zhang 和南特大学的 Francois Lemarchand 绘制了书中的插图。感谢萨拉戈萨大学的 Ignacio Lope 设计了各章中的问题，并给出了相应的答案。感谢爱尔兰国立高威大学的 Migle Makelyte 整理了书中的参考文献。感谢康威泰科有限责任公司 (Convertec Ltd) 的 Slawomir Duda、保罗萨·巴蒂埃大学的 Robin Draye、南特大学的 Lionel Breuil 对磁性元器件进行了相关测试。感谢 Pádraig Ó' Catháin 博士用 Latex 输入了书中的公式。感谢 Dee Enright 和 John Breslin 设计了本书的封面。

感谢 Mari Moran 编辑了全书，感谢 Francois Lemarchand 修改了插图、编写了 MATLAB 程序、整理了参考文献，特别感谢他们两人将两份独立的手稿整理成一份紧凑的书稿。

感谢 Wiley 出版社奇切斯特分部的员工指导我们整理本书样稿。

本书经爱尔兰国立高威大学出版基金和爱尔兰国立大学学术出版基金资助出版。

最后，衷心感谢家人长期以来对我们工作的支持。感谢我们的妻子 Kathleen 和 Ingrid，感谢我们的孩子 Deirdre、Fergus、Yvonne、Julian 和 Maureen。

原 书 前 言

长期以来，变压器和电感器等磁元件的设计一直引起电子与电气工程师的广泛关注。传统设计方法主要依靠经验，参照已有产品进行设计。过去的产品由于设计比较保守，上述方法能够满足要求。但当前的产品对减小体积、降低成本的需求越来越突出，因而需要更加严格的设计。另外，电源仍然是便携式电子设备中最大的部件之一，主要依靠电力电子技术来实现能量系统功率变换，而所有的电力电子变换器都包含磁元件，如功率传输变压器和储能电感器。

高功率密度和高效率是电源一贯的发展方向。为减小电源体积，需要提高开关频率，但其瓶颈在于如何合理设计相应的磁元件。因此，新的设计方法或概念应运而生，许多过去不被工业界所接受的诸如平面磁元件、集成磁元件和矩阵结构等概念正逐渐普及。

合理设计磁元件主要在于对各部分需求进行折中。传统设计主要考虑磁心损耗和线圈损耗尽量相等。但是，随着频率增加，损耗也将提高。因此，变换器开关频率提高后需要考虑相应增加的磁元件损耗。

磁元件比较特殊，通常没有现成产品。电感器和磁场之间的关系就如同电容器和电场之间的关系。在诸多应用场合，电容器有现成产品，而电感器和变压器没有类似标准化产品，其原因主要有：

1) 根据对偶原理，电容器具有额定工作电压，而电感器则有额定工作电流。用于制造电容器的介电材料种类繁多，在不额外增加成本的情况下，即可满足其额定工作电压指标，因而可以很容易制造出各种额定工作电压指标的电容器。

2) 电感器中流过电流时会带来热损耗，其温度将升高。这与磁元件的体积指标是相通的，为降低电感器温度，需要选择更大体积的磁元件。通常磁元件是电路中最大的元件，合理设计其尺寸至关重要。

3) 再回到对偶原理，磁元件中铁磁材料与磁场之间的关系就如同电容器中介电材料和电场之间的关系。通常，介电材料能够在非常宽的电压和频率范围内保持线性特性，而铁磁材料却具有很强的非线性，稍微偏离设计指标便会饱和，而且，电感器大小还与频率有关。另外，电

容器温度升高主要不是由介电损耗导致的，而电感器温度升高的一个主要原因就是磁心损耗。

基于上述原因，磁元件的设计过程比较复杂，对于不同的应用场合需要单独设计。磁元件损坏主要是由于其温升过高导致的，因而在设计中需要兼顾电气指标和散热指标。优秀的磁元件设计人员需要掌握电路分析、电磁原理和传热学等相关的知识。本书目的在于总结磁元件设计过程中需要掌握的各方面知识，建立简单易行的设计规则。

本书可分为四部分，采取循序渐进的方式引导读者从磁学入手，逐步深入。本书较全面地涵盖了各种材料，可以为学生、科研人员以及工程师在电感和变压器设计中提供综合性的参考。

引言主要介绍了磁元件的基本概念，为后面几章做了铺垫。首先介绍了撰写本书的背景，回顾了电磁学的基本定律。然后介绍了自感和互感的定义，并分析了几种实际设计时将会用到的线圈结构。最后介绍了几何平均距离和几何平均半径的概念，从而将细丝线的计算公式与实际线圈所用的利兹线这样的多股线（如利兹线）计算公式联系起来。

第一部分首先建立了电感器的设计规则，给出了几种不同类型电感器的设计实例。空心电感器以及绕制在铁磁磁心或铁磁基板上的单线圈电感器都是用来储存能量的。而反激变换器的电感器是一种特例，它往往有多个绕组，且能量在这些绕组中传递，因此，对于它的分析将归类到第二章。

第二部分涉及变压器的通用设计方法，给出了很多应用于整流器和开关电源的例子。着重介绍了现代电路，其电压或电流波形通常为非正弦，因而需要计算非正弦波形的功率因数。在现代功率变换器中，输入电压与输出电压存在较大变比时，变压器主要用于提供电气隔离、减少器件应力。变压器工作在比较高的频率可以减少电源的总体积。

变压器的尺寸与工作频率成反比，但是随着频率的升高，其损耗也相应增加。高频运行时，导体中电流分布不均匀，将在绕圈中产生集肤效应和临近效应；同时，由于磁心中涡流和磁滞现象的存在，磁心损耗相应增加。为解决以上问题，本书建立了一套通用设计规则用于对变压器绕圈进行优化设计。对于不同形状的电感和工作条件，尤其是开关电源中所遇到各种波形本书都进行了详细介绍。最后给出了一个简单明了的公式用来优化变压器导电层的厚度。

最后，第三部分探讨一些更加深入的内容。作者认为，如果不探讨

磁元件的测量，本书将不够完整，而这部分内容通常容易被忽略。测试仪器的发展大大提高了磁元件参数测试精度。由于磁元件的磁滞特性，当测试电感方法有误时，很容易就能发现问题。此外，平面磁元件已经成为当前应用的主流，将电源集成到芯片中也已经成为现实。

本书主要适用于电气工程和电力系统专业的本科生、研究生和应用工程师等。本书推导出了比较完善的变压器和电感器设计方法，并给出了过去的一些参考文献。因而，对于科研人员来说，本书也是一本重要的参考资料。本书内容紧扣主题、强调基本原理、举例广泛，提供了最新的磁元件设计方法。

本书相关网站 www.wiley.com/go/hurley_transformers 中提供了与本书配套的讲座资料、各章问题答案和书中插图，欢迎下载。

Prof. W. G. Hurley 和 Dr Werner Wölfle
爱尔兰国立高威大学

本书符号释义

下面是本书中出现的符号及其定义。

A	平均或几何平均半径
A_c	磁心截面面积
A_g	气隙截面面积
A_L	每匝电感
A_m	磁路有效截面积
A_p	磁心窗口面积与截面面积的乘积
A_t	绕线变压器的表面积
A_w	裸线导电面积
a	变压器变比
a_1, a_2	线圈的内半径和外半径
B_{\max}	最大磁感应强度
B_o	最优磁感应强度
B_{sat}	饱和磁感应强度
b	图 6.4 中绕组尺寸
C_{eff}	变压器的有效电容
D	占空比
d	导电箔或导电层的厚度
d_1, d_2	铁磁材料衬底上面细丝线或线圈中心的高度
Φ	磁动势
f	频率 (单位: Hz)
G, g	最大气隙长度和最小气隙长度
GMD	线圈间几何平均距离
$g(x)$	x 处的气隙长度
h	图 2.14 中线圈尺寸
h_c	热对流传递系数
h_1, h_2	线圈轴向高度
\hat{I}	电流波形峰值
I_{dc}	电流平均值
I_n	电流 n 次谐波有效值
$I_n(x), K_n(x)$	第一类和第二类修正贝塞尔函数

I'_{rms}	电流波形导数的有效值
I_{rms}	电流波形的有效值
J_0	电流密度
$J(r)$	半径为 r 处电流密度
$J_0(x), J_1(x)$	第一类贝塞尔函数
K_c	材料参数
$K(f), E(f)$	第一类和第二类全椭圆积分
K_i	电流波形系数
K_t	48.2×10^3
K_v	电压波形系数
k	耦合系数
k_a, k_c, k_w	无量纲常数[见式(3.25)~式(3.27)]
k_f	磁心叠片系数 A_m/A_c
k_i	见式(7.28)定义
k_p	功率因数
k_{pn}	n 次谐波时对应交流电阻与直流电阻之比
k_s	集肤系数
k_u	窗口利用率
L	自感
L_{eff}	有效电感
L_1	漏感
L_m	励磁电感
L_s	由铁磁基板产生的额外线圈电感
l_c	磁心平均磁路长度
M	互感
MLT	平均每匝长度
m	$\sqrt{(j\omega\mu_0\sigma)}$
N	线圈匝数
n	谐波次数
P_{cu}	铜损或绕组损耗
P_{fe}	铁损或磁心损耗
P_o	输出功率
P_v	单位体积功率损耗
p	层数
R	平均半径或几何平均半径
\mathcal{R}	磁阻