

电气工程电磁热场 模拟与应用

程志光 高桥则雄 博扎德·弗甘尼 等著

Electromagnetic and
Thermal Field Modeling and
Application in Electrical Engineering

Cheng Zhiguang Norio Takahashi Behzad Forghani *et al*



科学出版社

www.sciencep.com

电气工程电磁热场 模拟与应用

程志光 高桥则雄 博扎德·弗甘尼 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书集中研究电气工程中的低频电磁热场模拟技术及应用。以大型电力变压器为工程背景,阐述相关领域的发展和需要进一步深入研究的问题,介绍电磁热场有限元分析中的关键技术、磁性材料模拟基础研究和产品级模型实验、基准问题族的提出与建立、数值分析方法的有效性验证、电磁热耦合场模拟和脚本开发,以及典型工程应用。其中包括中国、日本、加拿大三方作者长期进行电磁热场相关研究开发和应用所取得的成果,也包括近期三方合作的研究成果,书中还提供了典型模型、实例的翔实的实验研究和数值计算结果。

本书可供电气工程领域从事工程研究、产品设计和应用的工程技术人员阅读,亦可供高等院校电气工程专业的研究生、本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气工程电磁热场模拟与应用/程志光等著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023561-9

I. 电… II. 程… III. ①电场 ②电磁场 IV. 0441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 190755 号

责任编辑:刘红梅 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:朱 平

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 5 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 5 月第一次印刷 印张: 29 1/4

印数: 1—3 000 字数: 557 000

定 价: 69.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

大型电磁装置的设计、制造、运行中经常遇到电磁热场问题,其中包括强非线性、任意方向异性的磁性材料和复杂激励条件下的电磁场、损耗及热场有效模拟。为了解决那些复杂的实际问题,需要研究开发工程电磁热耦合物理场的分析方法和软件,对其进行基于基准模型和可能的实际产品的工程有效性及可用性的严格检验、面向工程实际的材料综合性能模拟及许用临界条件的确定,建设和逐步完善饱含产品设计、制造、试验研究经验的专家系统等。

工程电磁热场研究和应用领域中不断推陈出新,需要去思考、发现、挑战那些源于工程和科学前沿的“棘手”问题,从数字仿真和实验研究两个方面试着去解决那些问题。一个复杂问题的解决需要很多人的智慧和力量,需要科学家、工程师形成合力去寻求有效解决工程问题的方案。在分析方法创新的同时,还应注重材料模拟和测试分析方法的工程有效性。因为将没有经过有效性严格测试的分析方法和软件用于解决关键工程问题的后果是不可想象的,而分析方法和材料模拟技术的改进、创新以及成果应用更是任重道远。

本书以大型电力变压器为主要工程背景,集中力量研究工程电磁热场模拟技术及工业应用的相关问题。全书分为 5 个部分 12 章;第 I 部分阐述大型电力变压器工程中的电磁热场问题、制造业现状、工业应用和有限元方法基础;第 II 部分扼要介绍解决工程电磁热场问题的一些可行的应用技术,电工磁性材料的综合性能模拟的应用基础性研究,以及面向工程需求进行的硅钢片的多向异性、产品级的方形和环形铁心综合电磁性能等实验研究;第 III 部分全面总结基于国际 TEAM Problem 21 基准族(Benchmark Family)的各种条件下杂散损耗的模型实验和有限元数值模拟、有效性验证及其发展,包括取向硅钢叠片内由漏磁通引起的附加铁损的研究;第 IV 部分详细阐述基于低频磁热软件 MagNet 和 ThermNet 求解工程电磁热耦合场的数值实现过程和方法,并简介大型工程问题的有限元分析结果通过应用程序界面(API)的专用脚本(script)开发;第 V 部分对具有典型意义的变压器工程问题(例如交流变压器直流偏磁条件下非线性、时间非对称电磁场问题)进行实验研究和数值仿真。

本书是作者多年的工程实践经验和科研成果的结晶,亦是来自国内外三支研究、开发、应用团队的科研成果的交融,他们是保定天威集团有限公司(Baoding Tianwei Group Co., Ltd)、日本冈山大学(Okayama University)和加拿大 Infolytica 公司。各位作者合作完成了本书涉及的各项实验研究和相关仿真工作,撰写的研究报告和论文为本书提供了基础数据。

本书的编写工作分工如下:第 1、5~9 章,程志光;第 2 章,程志光、高桥则雄;第

3、4 章,高桥则雄(英文稿),刘兰荣、范亚娜译校;第 10 章,Behzad Forghani(英文稿),杜永、张献译,王彤宇校;第 11 章,张俊杰;第 12 章,郭满生。全书由程志光统稿。

衷心地感谢各有关单位、国内外同行的合作和帮助。谢德馨教授和胡启凡教授审阅了书稿,提出了许多重要的修改意见。本书涉及的多项实验研究由胡启凡教授提议、指导完成,焦翠坪高级工程师指导并参与了多项实验。技术中心的韩贵胜、王保利、任晓鹏、侯录海等参加了部分模拟实验。刘硕博士在书稿准备过程中提供了多方面支持。天威保变、特变、顺达、互感器等公司的有关领导张喜乐、孙新忠、贾建刚、王文娣等,多年合作的同事高生、王建民、吴明训等对实验研究和数值仿真工作给予了大力支持。在本书的写作过程中,作者和众多变压器资深专家进行了非常有益的讨论。在此向他们致以诚挚的谢意。另外还要特别感谢保定天威集团各级领导丁强、石光瑞、景崇友、周文焘、赵秀生、焦翠坪等,以及历届公司(厂)领导、各位前辈、师长所给予的大力支持和帮助。

向为本书出版作出贡献的每一位同仁表示敬意!

本书得到国家自然科学基金项目(项目编号:50777042 和 50677016)、河北省自然科学基金项目(项目编号:E2006001036 和 E2006000772)和河北省专项人才培养基金的支持。希望本书对面对复杂实际问题的工程研究者、产品设计者和应用工程师有所启发和借鉴,以推动电磁热场研究的工业应用。

限于作者水平及沟通时间紧促,且所涉及的一些研究工作尚待继续进行,书中的不妥和疏漏之处在所难免,敬请指正。

作 者

目 录

第 I 部分 工程电磁热场问题和有限元方法基础

第 1 章 绪 论	3
1.1 工程电磁热场模拟	3
1.2 变压器工程概述	4
1.2.1 现代变压器制造业	4
1.2.2 变压器工程中需要解决的问题	7
1.3 电磁设计面临的挑战	9
1.4 快捷的电磁设计方法	13
1.5 本书的总体构成	14
参考文献	14
第 2 章 低频电磁场问题和有限元分析方法基础	17
2.1 引 言	17
2.2 麦克斯韦方程组	18
2.3 低频涡流问题分析的控制方程	20
2.4 A_r - V - A_r 方法	21
2.5 矢量伽辽金与标量伽辽金处理	22
2.6 关于棱单元的讨论	23
2.7 节点元和棱单元的基本方程和伽辽金余量比较	24
2.8 节点元和棱单元的系数阵中非零元素、总未知数的比较	25
2.8.1 未知量和矩阵中非零元素的个数	25
2.8.2 非零元素和总未知数的比较	26
2.9 本章小结	27
参考文献	28
附 录	30

第 II 部分 电磁热场分析中的关键技术和磁性材料模拟

第 3 章 电磁热场模拟的一些关键技术	39
3.1 引 言	40
3.2 特殊单元	40
3.2.1 特殊单元概述	40
3.2.2 特殊单元中的位分布	41
3.2.3 有限元公式	42
3.2.4 算 例	42
3.3 电压源激励的磁场分析	45
3.3.1 考虑电压源的有限元法	45
3.3.2 实例分析	47
3.4 优化设计方法	48
3.4.1 各种优化方法	48
3.4.2 试验设计法	48
3.4.3 Rosenbrock 方法	49
3.4.4 进化策略	50
3.4.5 ON/OFF 算法	52
3.4.6 应用举例	54
3.5 磁热耦合分析	64
3.5.1 热场分析	64
3.5.2 磁热分析	65
3.5.3 磁热流体分析	67
3.6 本章小结	72
参考文献	72
第 4 章 磁性材料模拟	74
4.1 引 言	75
4.2 B - H 曲线模拟	75
4.2.1 B 与 H 的关系	75
4.2.2 分段多项式拟合方法	76
4.2.3 高磁通密度下 B - H 曲线的逼近	77
4.3 各向异性的模拟	78
4.3.1 双 B - H 曲线模型	78

4.3.2 多 B - H 曲线模型	80
4.3.3 E&S 模型	86
4.4 磁滞模拟	86
4.4.1 各种磁滞模型	86
4.4.2 插值方法	87
4.4.3 Preisach 模型	88
4.4.4 Jiles-Atherton 模型	92
4.4.5 Stoner-Wohlfarth 模型	93
4.4.6 单相变压器中磁滞效应对磁通分布的影响	95
4.5 铁损的估计	97
4.5.1 交变磁通下的铁损	97
4.5.2 旋转磁通下的铁损	99
4.6 叠片铁心模拟	101
4.6.1 叠片铁心及各种建模方法	101
4.6.2 均匀化方法	101
4.6.3 分区法	102
4.7 影响电工钢片磁特性的因素	106
4.7.1 由剪切引起的残余应力	107
4.7.2 压应力	108
4.7.3 挤压和过盈装配对电机铁心铁损的影响	110
4.7.4 旋转磁通下的铁损	111
4.7.5 直流偏磁下的铁损	112
4.8 本章小结	116
参考文献	116
附 录	119

第 5 章 硅钢片的多方向电磁性能模拟	122
5.1 引 言	122
5.2 磁各向异性问题	123
5.3 爱泼斯坦方圈测量方法	125
5.4 硅钢片的磁各向异性测量	127
5.4.1 测量原理和设备	127
5.4.2 试样制作	129
5.4.3 实验程序	130
5.5 测量结果与分析	130
5.5.1 退火前 B_m - H_m 曲线(30P120)	130

5.5.2 退火前 B_m - W_t 曲线(30P120)	132
5.5.3 退火后 B_m - H_m 曲线(30P120)	132
5.5.4 退火后 B_m - W_t 曲线(30P120)	134
5.5.5 退火前后 B_m - H_m 曲线比较	134
5.5.6 30P120 试样退火前后 B_m - W_t 曲线比较	138
5.6 试样退火前后磁性能测量中电压开始畸变时的波形记录	141
5.7 本章小结	148
致 谢	148
参考文献	149
附 录	150
第 6 章 产品级方形铁心的电磁性能模拟	171
6.1 引 言	172
6.2 两个铁心模型	172
6.3 实验仪器设备及性能	174
6.4 实验线路	175
6.5 实验项目及实验方法	175
6.5.1 实验项目	175
6.5.2 实验方法及注意事项	176
6.6 功率的有功和无功分量在铁心接缝区和柱-轭区的分配	176
6.6.1 电压、电流波形	176
6.6.2 铁心激磁伏安分离	177
6.6.3 有功功率的分离	184
6.7 铁心的电磁性能模拟	188
6.7.1 铁心的 B_m - H_b 和 B_m - W_t 曲线	188
6.7.2 硅钢片材料的性能曲线(30Q140)	189
6.8 本章小结	192
致 谢	193
参考文献	193
附 录	193
第 7 章 环形铁心产品退火前后的磁性能模拟	202
7.1 引 言	202
7.2 铁心模型技术数据	203
7.3 实验仪器设备及性能	204
7.4 实验方法	204

7.5 实验结果	205
7.5.1 环形铁心退火前后磁性能曲线	205
7.5.2 环形铁心 B_m-H_b 曲线、 B_m-W_t 曲线重复性实验	208
7.6 本章小结	209
致 谢	209
参考文献	209
附 录	210

第Ⅲ部分 Problem 21 基准族和叠片内附加铁损问题研究

第 8 章 Problem 21 基准族及电工杂散损耗模拟	217
8.1 引 言	218
8.2 TEAM Problem 21 的发展	220
8.3 Problem 21 基准族的定义	223
8.3.1 基准模型	223
8.3.2 基准族的数据	231
8.3.3 需要计算的场量	232
8.4 数值分析和测量	233
8.4.1 涡流分析方法概述	233
8.4.2 铁损和磁通的测量	234
8.5 计算和测量结果	238
8.5.1 Problem 21	239
8.5.2 Problem 21 ^a	241
8.5.3 Problem 21 ^b	244
8.5.4 Problem 21 ^c	248
8.5.5 Problem 21 基准族的“损耗谱”	250
8.6 Problem 21 进入饱和状态	252
8.6.1 不同激励条件下的非线性迭代收敛过程	252
8.6.2 饱和因子的引入	254
8.6.3 关于准饱和问题的分析	254
8.7 双线圈中激磁电流变向时的损耗	257
8.8 本章小结	259
致 谢	260
参考文献	260
附 录	264

第 9 章 叠片中附加铁损的模型实验和分析	274
9.1 引 言	274
9.2 模型结构和技术数据	275
9.2.1 模型的结构尺寸	275
9.2.2 测量线圈的设置	275
9.3 实验方法及实验项目	277
9.3.1 实验线路	277
9.3.2 实验方法	277
9.4 实验结果	279
9.4.1 P21-M1 的损耗测量结果	279
9.4.2 P21-M2 的损耗测量结果	280
9.4.3 P21-M1 和 P21-M2 模型测量线圈中交链磁通的波形	280
9.4.4 P21-M1 和 P21-M2 模型硅钢片中平均磁通密度的波形	282
9.4.5 P21-M1 和 P21-M2 的平均磁通密度的最大值	283
9.5 三维有限元计算和结果	287
9.5.1 三维有限元模型	287
9.5.2 铁损的测量和计算结果	287
9.5.3 叠片中交链磁通的测量和计算结果	288
9.5.4 指定位置的漏磁通的测量和计算结果	291
9.6 本章小结	292
致 谢	293
参考文献	293
附 录	293

第Ⅳ部分 电磁热耦合场分析和应用脚本开发

第 10 章 电磁热耦合场数值求解	297
10.1 引 言	297
10.2 仿真工具的使用	298
10.3 MagNet 与 ThermNet 简介	299
10.4 使用 MagNet 与 ThermNet 建模	299
10.4.1 几何造型	299
10.4.2 线圈与激励源	301
10.4.3 电 路	302
10.4.4 材料性能	303

10.4.5 边界条件	309
10.4.6 热 源	313
10.4.7 计算精度问题	314
10.5 从 MagNet 与 ThermNet 中提取结果	327
10.5.1 MagNet 与 ThermNet 中的场	327
10.5.2 场的可视化	329
10.5.3 动画效果	336
10.5.4 场值提取	337
10.5.5 全局量	337
10.5.6 脚本的使用	341
10.6 电磁场计算	344
10.6.1 求解电磁场问题	344
10.6.2 边界条件	345
10.6.3 电磁场问题的规模	345
10.6.4 表面阻抗法	345
10.6.5 集肤深度建模	347
10.7 电磁损耗和热场问题的计算	348
10.7.1 热场问题的求解	348
10.7.2 热场问题的规模	348
10.8 电磁场和热场耦合问题的求解机理	349
10.8.1 求解电磁-热耦合问题	349
10.8.2 耦合求解的控制	350
10.8.3 电磁场和热场耦合问题的求解	350
10.9 本章小结	351
参考文献	351

第 11 章 基于应用程序界面的脚本开发	352
11.1 引 言	352
11.2 脚本开发基础	353
11.2.1 脚本的定义和作用	353
11.2.2 脚本的分类	354
11.2.3 简明的基础语法	354
11.3 脚本文件开发	363
11.3.1 自动建模	363
11.3.2 录制脚本	367
11.3.3 交互操作	367
11.3.4 导出场值	370

11.4 计算变压器绕组参数脚本开发	372
11.4.1 计算变压器绕组参数脚本的特点	372
11.4.2 实现的目标	372
11.4.3 用有限元计算绕组涡流损耗的方法	373
11.4.4 实现过程	373
11.5 本章小结	378
参考文献	378

第 V 部分 电力变压器工程研究及应用

第 12 章 变压器直流偏磁问题的工程模拟	381
12.1 引 言	382
12.1.1 直流偏磁问题的特点	382
12.1.2 已有进展和遇到的困难	384
12.1.3 本章的主要内容	385
12.2 直流偏磁条件下的材料特性	386
12.2.1 变压器铁心的 Φ - I 与 B - H 曲线	386
12.2.2 变压器铁心的 B_m - W 曲线	393
12.3 直流偏磁条件下激励电流的计算	394
12.3.1 迭代法原理	394
12.3.2 计算方法有效性的确认	397
12.3.3 激磁电流的谐波分析	400
12.3.4 产品谐波分析实例	402
12.4 直流偏磁条件下变压器磁场和损耗的计算	409
12.4.1 建模时需考虑的因素	409
12.4.2 空载偏磁条件下的磁场和损耗的计算	411
12.4.3 负载偏磁条件下的磁场和损耗计算	419
12.4.4 偏磁对损耗的影响	424
12.5 变压器耐受直流偏磁能力的研究	425
12.6 本章小结	428
致 谢	429
参考文献	429
附 录	430

工程电磁热场相关术语	435
------------------	-----

Contents

Part I Engineering Electromagnetic and Thermal Field Problems and FEM Fundamentals

Chapter 1	General Survey	3
1.1	Engineering Electromagnetic and Thermal Field Modeling	3
1.2	On Transformer Engineering	4
1.2.1	Modern Transformer Industry	4
1.2.2	Some Research Projects in Power Transformers	7
1.3	Electromagnetic Design Facing New Challenges	9
1.4	Fast Electromagnetic Design Method	13
1.5	Global Frame of the Book	14
	References	14
Chapter 2	Electromagnetic Fields at Low Frequency and Basis of Finite Element Method	17
2.1	Introduction	17
2.2	Maxwell's Equations	18
2.3	Governing Equations for Low Frequency Eddy Current Problems	20
2.4	$\mathbf{A}_t$ - $\mathbf{V}$ - $\mathbf{A}_t$ Method	21
2.5	Vector and Scalar Galerkin Process	22
2.6	Discussion on Edge Elements	23
2.7	Equation and Galerkin Residual of both Node- and Edge-Based Elements ($\mathbf{A}$ - $\mathbf{V}$ method)	24
2.8	Non-zero Entries and Unknowns for both Node- and Edge-Based Elements	25
2.8.1	Estimation on Non-zero Entries and Unknowns	25
2.8.2	Comparison between Computing Costs of Two Kinds of Elements	26

2.9 Summary	27
References	28
Appendix	30

Part II Key Techniques in Electromagnetic and Thermal Field Simulation and Magnetic Material Modeling

Chapter 3	Some Key Techniques of Electromagnetic and Thermal Field Modeling	39
3.1	Introduction	40
3.2	Special Elements	40
3.2.1	What is Special Element	40
3.2.2	Distribution of Potentials in Special Elements	41
3.2.3	Finite Element Formulation	42
3.2.4	Some Examples	42
3.3	Voltage Driven Analysis	45
3.3.1	FEM Considering Voltage Sources	45
3.3.2	An Example	47
3.4	Optimal Design Method	48
3.4.1	Various Optimization Methods	48
3.4.2	Experimental Design Method	48
3.4.3	Rosenbrock's Method	49
3.4.4	Evolution Strategy	50
3.4.5	ON/OFF Method	52
3.4.6	Examples of Application	54
3.5	Magnetic-Thermal Coupled Analysis	64
3.5.1	Thermal Analysis	64
3.5.2	Magnetic-Thermal Analysis	65
3.5.3	Magnetic-Thermal Fluid Analysis	67
3.6	Summary	72
	References	72

Chapter 4	Magnetic Material Modeling	74
4.1	Introduction	75
4.2	Modeling of B - H Curve	75
4.2.1	Relationship between B and H	75
4.2.2	Sectional Polynomial Approximation	76
4.2.3	Approximation of B - H Curve at High Flux Density	77
4.3	Modeling of Anisotropy	78
4.3.1	Two B - H Curves Model	78
4.3.2	Multi- B - H Curves Model	80
4.3.3	E&S Model	86
4.4	Hysteresis Modeling	86
4.4.1	Various Hysteresis Models	86
4.4.2	Interpolation Method	87
4.4.3	Preisach Model	88
4.4.4	Jiles-Atherton Model	92
4.4.5	Stoner-Wohlfarth Model	93
4.4.6	Effect of Hysteresis on Flux Distribution of Single-Phase Transformer	95
4.5	Estimation of Iron loss	97
4.5.1	Iron Loss under Alternating Flux	97
4.5.2	Iron Loss under Rotating Flux	99
4.6	Modeling of Laminated Core	101
4.6.1	Laminated Core and Various Modeling Methods	101
4.6.2	Homogenization Method	101
4.6.3	Two-Zone Method	102
4.7	Factors Affecting Magnetic Properties of Electrical Steel	106
4.7.1	Residual Stress by Cutting	107
4.7.2	Compressive Stress	108
4.7.3	Effect of Press and Shrink Fitting on Iron Loss of Motor Core	110
4.7.4	Iron Loss under Rotating Flux Excitation	111
4.7.5	Iron Loss under DC Bias Excitation	112
4.8	Summary	116
	References	116
	Appendix	119

Chapter 5	Measurements of Multi-Directional Anisotropy Using Epstein Frame	122
5.1	Introduction	122
5.2	Magnetic Anisotropy Problems	123
5.3	Measurement of Magnetic Properties Using Epstein Frame	125
5.4	Multi-Directional Magnetic Anisotropy Modeling of Grain-Oriented Silicon Steel Sheets	127
5.4.1	Principle and Equipments	127
5.4.2	Sampling	129
5.4.3	Test Procedure	130
5.5	Measurement Results and Discussions	130
5.5.1	B_m - H_m Curve before Annealing (30P120)	130
5.5.2	B_m - W_t Curve before Annealing (30P120)	132
5.5.3	B_m - H_m Curve after Annealing (30P120)	132
5.5.4	B_m - W_t Curve after Annealing (30P120)	134
5.5.5	Comparison between the B_m - H_m Curves Measured before and after Annealing	134
5.5.6	B_m - W_t Curves for 30RGH120 and 30P120 Silicon Steel Sheets	138
5.6	Waveforms of both Voltage and Current at the Moment the Waveform of Voltage is Distorted	141
5.7	Summary	148
	Acknowledgement	148
	References	149
	Appendix	150

Chapter 6	Electromagnetic Properties Modeling Based on Laminated Core Models	171
6.1	Introduction	172
6.2	Two Laminated Core Models	172
6.3	Instruments Used in the Experiments	174
6.4	Experimental Circuit	175
6.5	Measurement Items and Methods	175
6.5.1	Measurement Items	175