



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

电力变压器工程

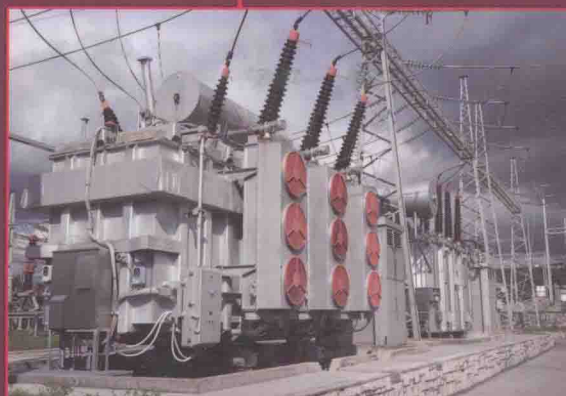
(原书第3版)

**Electric Power Transformer
Engineering(Third Edition)**

[美]詹姆斯 H.哈洛 (James H. Harlow) 主编

保定天威保变电气股份有限公司 译

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电力变压器工程

(原书第3版)

[美] 詹姆斯 H. 哈洛 (James H. Harlow) 主编
保定天威保变电气股份有限公司 译



机械工业出版社

Electric Power Transformer Engineering 3rd Edition/by James H. Harlow/
ISBN: 9781439856291

Copyright © 2012 by CRC Press.

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 Machine 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机械工业出版社独家出版并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。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2012-8709 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电力变压器工程: 第3版/[美]哈洛 (Harlow, J. H.) 主编. 保定天威保变电气股份有限公司译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 12

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Electric Power Transformer Engineering (Third Edition)

ISBN 978-7-111-52948-4

I. ①电… II. ①哈…②保… III. ①电力变压器 IV. ①TM41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 026581 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: 赵玲丽 责任编辑: 赵玲丽

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延翔

封面设计: 马精明 责任印制: 李 洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 41.5 印张 · 927 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-52948-4

定价: 149.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书共 25 章, 其中第 1 章介绍基本理论和原理, 包括电力变压器的基本概念数学模型和基本形式; 第 2 ~ 11 章分别介绍 10 类变压器类产品, 即电力变压器、配电变压器、移相变压器、整流变压器(换流变压器)、干式变压器、互感器、步进调压器、恒压变压器、风力涡轮发电机和光伏发电用变压器, 以及电抗器; 第 12 ~ 25 章介绍相关专题, 包括绝缘介质、电工套管、分接开关和智能控制、负荷和热性能、变压器的连接、变压器试验、有载分接开关控制和变压器并联运行、变压器保护、变压器声级产生的原因及影响、绕组电压的瞬态响应、变压器的安装和维修、问题和故障调查、油浸式变压器的在线监测, 以及美国电力变压器设备的标准和审批程序。

本书知识面宽广, 信息量巨大, 所引参考文献几乎纵贯变压器的整个发展史。本书可用作变压器和电力行业技术人员工具书, 也可供从事相关教学和科研的人员参考。

译者序

自改革开放以来,我国变压器类产品的开发和生产日新月异,到目前,无论从品种上说,还是从容量、电压等级上说,都已经跨入世界先进行列。尽管各相关期刊每年都登出大量的变压器类论文,但是,汇编成册的工具书却屈指可数,和变压器有关的技术人员对这类工具书的需求与日俱增。

正是在这种背景下,保定天威保变电气股份有限公司受机械工业出版社委托,组织人员翻译了由 James H. Harlow 先生主编的《电力变压器工程(原书第3版)》。本书共25章,其中第1章介绍基本理论和原理,包括电力变压器的基本概念、数学模型和基本形式;第2~11章分别介绍10类变压器类产品,即电力变压器、配电变压器、移相变压器、整流变压器(换流变压器)、干式变压器、互感器、步进调压器、恒压变压器、风力涡轮发电机和光伏发电用变压器,以及电抗器;第12~25章介绍相关专题,包括绝缘介质、电工套管、分接开关和智能控制、负荷和热性能、变压器的连接、变压器试验、有载分接开关控制和变压器并联运行、变压器保护、变压器声级产生的原因及影响、绕组的电压瞬态响应、变压器的安装和维修、问题和故障调查、油浸式变压器的在线监测,以及美国电力变压器设备的标准和审批程序。

本书知识面宽广,信息量巨大,所参考文献几乎纵贯变压器的整个发展史。本书可用作变压器和电力行业技术人员工具书,也可供从事相关教学和科研的人员参考。

本书由保定天威保变电气股份有限公司组织翻译。其中,前言、第1、2章由马丽景高级工程师翻译;第3章由刘学民高级工程师翻译;第4、15、20章由谢京高级工程师翻译;第5、6、7章由陈志国高级工程师和孙锋工程师翻译;第8、9、10、12章由王文昌教授级高级工程师翻译;第11、19章由张栋教授级高级工程师翻译;第13、17章由高中纪教授级高级工程师翻译;第14、18章由程从明高级工程师翻译;第16章由郭建贞教授级高级工程师翻译;第21、22章由李众祥高级工程师和王海硕工程师翻译;第23、24、25章由孙继成高级工程师翻译;全书由王文昌教授级高级工程师校核。

本书的公式表达、图形及文字符号均遵照原书,未按我国标准进行修改。

限于译者水平,书中不妥和错误之处在所难免,衷心欢迎使用本书的读者批评指正。

译者

2015年9月

原 书 前 言

在此,我首先感谢 Leo Grigsby 教授当时邀请我负责编写《电力工程手册(第1版)》(2001年)中“电力变压器”这一章。现在,《电力工程手册》在业内已经广为流行。自那以后,大家逐渐达成一个共识:2001版的《电力工程手册》中的两章,也就是①变电站,②变压器,可以从中分离出来,并进一步充实内容,在保留它们和 Grigsby 教授整套手册隶属关系的前提下,将它们单独编写成两本书。因此,CRC 出版社在2004年推出《电力变压器工程(第1版)》,2007年又推出了第2版,现在已经是第3版。

作为本书的主编,我的责任是确保各章作者的信息指向那些了解基础物理学及实际应用且拥有电力变压器实际工作知识的工程师们。因此,我们相信,所有具有电力变压器背景的人,无论他们是仅仅出于对于本书感兴趣的经验丰富的专业人员,或者是世所公认的专家,他们都能够从本书发现大量相关知识。我们还相信,这样的读者会从中收集到和他们个人专业水平相当的技术资料。

本书整体上分为三部分:

第一部分为第1章,基本理论和原理:

本章向电力工程师介绍电力变压器的基本理论和原理(概念和数学)。

第二部分为第2~11章:

这10章中的每一章各介绍一种具体的电力变压器及其相关附件。

- 电力变压器;
- 配电变压器;
- 移相变压器;
- 整流变压器;
- 干式变压器;
- 互感器;
- 步进调压器;
- 恒压变压器;
- 风力涡轮发电机和光伏发电用变压器;
- 电抗器。

第三部分为第12~25章:

这14章中的每一章各介绍一个关于基本变压器运行和设计的基础辅助专题。

- 绝缘介质;
- 电工套管;
- 分接开关和智能控制;

- 负荷和热性能;
- 变压器的连接;
- 变压器试验;
- 有载分接开关控制和变压器并联运行;
- 电力变压器的保护;
- 变压器声级产生的原因及影响;
- 绕组的电压瞬态响应;
- 变压器的安装和维修;
- 问题和故障调查;
- 油浸式变压器的在线监测;
- 美国电力变压器设备的标准和审批程序。

尽管很多章节的题目仍然和第2版一样,但是读者很快会发现,与本书第2版相比,在第3版中大部分章节已经增加了大量新的材料。每一章都插入了丰富的图片、公式以及表格数据,它们都和所讨论内容密切相关。

就我来说,在本书形成的过程中,我所起的最大的作用,就是很简单地利用了和专家们(各章作者来自于他们中间)所保持的长期而最为愉快的联系。每一个作者都热情支持我的这一努力。从这一点,我看到了电力变压器工程师团体的无私态度。没有他们的这一态度,没有他们,我绝无可能独自完成本书。

James H. Harlow

主 编 简 介



James H. Harlow 是自营哈洛工程公司总经理，从 1996 年起，他从事电力产业咨询服务。在这之前，他有 34 年在西门子公司（前身是埃利斯 - 查默斯公司）和贝克威斯电气公司工作的经历。在这些公司工作的时候，他管理或负责将电子技术融入电力变压器应用的开创性项目。其中有代表性的项目有两个，一个是最早导入微机智能电子设备，用于变电站参数统计分析（实现有载分接开关的自动控制），另一个是导入晶闸管有载分接开关，用于步进调压器分接开关发生故障时弱化电弧。

Harlow 在拉法耶特学院获得了工学学士学位（BSEE），从杰克逊维尔州立大学获得工商管理硕士学位（MBA），他的理科硕士学位（MS）是从密西西比州立大学获得的。1982 年他加入 IEEE PES 变压器分委会，曾在多个岗位工作。之后他成长为分委会的一名领导，并于 1994 ~ 1995 年期间担任分委会主席。在职期间，他监督所有由 IEEE 制定的电力变压器标准。在此期间，他一直是 IEEE 派遣参加 ANSI C57 主任委员会（变压器）会议的代表团成员。作为变压器分委会的主席，他也是 IEEE PES 技术委员会的成员，同时集 IEEE 电力和能源协会下属多个技术委员会的领导职务于一身。这种任职范围的不断扩大，使他在 2001 年至 2002 年就任 PES 技术副总裁和技术委员会主席之职。

Harlow 在报刊杂志发表论文 30 多篇，担任过 CRC 出版社 2001 年、2004 年和 2007 年版《电力工程手册》中变压器分册的主编。在本书中他执笔编写的一章是他的本专业，即有载分接开关控制和变压器并联运行（第 18 章）。作为一个美国六项专利的拥有者，Harlow 是一个注册的专业工程师和 IEEE 终生高级成员。

参加编写人员

- | | |
|------------------------|---------------------------|
| Dennis J. Allan | 莫林设计公司 英国斯塔福德 |
| Hector J. Altuve | 斯维策工程实验室有限公司 华盛顿州普尔曼 |
| Gabriel Benmouyal | 斯维策工程实验室有限公司 华盛顿州普尔曼 |
| Behdad B. Biglar | 传奇有限公司 加拿大安大略省多伦多 |
| Wallace B. Binder | 沃宾德咨询公司 宾夕法尼亚州纽卡斯尔 |
| David E. Buckmaster | 顾问 北卡罗莱纳州夏洛特 |
| Antonio Castanheira | 传奇有限公司 巴西米纳斯吉拉斯州邦苏塞苏 |
| Craig A. Colopy | 库柏电力系统公司 威斯康星州瓦克夏 |
| Robert C. Degeneff | 电力系统技术有限公司 纽约州瓦特弗利特 |
| Scott H. Digby | 进步能源公司 北卡罗莱纳州罗利 |
| Dieter Dohnal | MR 股份有限公司 德国雷根斯堡 |
| Douglas Dorr | 电力研究院 加利福尼亚州帕洛阿尔托 |
| Don A. Duckett | HD 公共供给公司 佛罗里达州奥兰多 |
| Richard F. Dudley | 传奇有限公司 加拿大不列颠哥伦比亚省纳尔逊 |
| Ralph Ferraro | 电力质量控制有限公司 田纳西州诺克斯维尔 |
| Anish Gaikwad | 电力研究院 加利福尼亚州帕洛阿尔托 |
| Dudley L. Galloway | 格洛韦变压器技术有限责任公司 密苏里州杰斐逊市 |
| Armando Guzmán | 斯维策工程实验室有限公司 华盛顿州普尔曼 |
| David L. Hanson | TJ/H2b 分析服务公司 加利福尼亚州萨克拉门托 |
| James H. Harlow | 哈洛工程公司 阿拉巴马州门托尼 |
| Ted Hauptert | TJ/H2b 分析服务公司 加利福尼亚州萨克拉门托 |
| William R. Henning | 华凯萨电力系统公司 威斯康星州瓦克夏 |
| Gary R. Hoffman | 先进电力技术公司 新泽西州伦道夫 |
| Philip J. Hopkinson | 高压股份有限公司 北卡罗莱纳州夏洛特 |
| Charles W. Johnson Jr. | ABB 公司 弗吉尼亚州布兰德 |
| Troy D. Kabrich | 华凯萨电力系统公司 威斯康星州瓦克夏 |
| Sheldon P. Kennedy | 尼亚加拉变压器有限公司 纽约州布法罗 |
| Axel Kraemer | MR 股份有限公司 德国雷根斯堡 |
| Arindam Maitra | 电力研究院 加利福尼亚州帕洛阿尔托 |
| Arshad Mansoor | 电力研究院 加利福尼亚州帕洛阿尔托 |
| Shirish P. Mehta | 华凯萨电力系统公司 威斯康星州瓦克夏 |
| Harold Moore | H·摩尔和同事 佛罗里达州尼斯维尔 |

- | | |
|-----------------------|--|
| Dan Mulkey | 太平洋电力公司 加利福尼亚州佩特卢马 |
| Randy Mullikin | 莫莱梅克电气公司 密苏里州古巴 |
| Dan D. Perco | 泊考变压器工程公司 加拿大安大略省斯托尼克里克 |
| Gustav Preininger | 顾问 奥地利格拉茨 |
| Thomas A. Prevost | 欧米隆电子集团 马萨诸塞州沃尔瑟姆 |
| Jeewan L. Puri | 变压器对策公司 北卡罗莱纳州马休斯 |
| Leo J. Savio | ADAPT 公司 宾夕法尼亚州迈尔斯敦 |
| Michael Sharp | 传奇有限公司 加拿大安大略省士嘉堡 |
| Hemchandra Shertukde | 哈特福德大学 康涅狄格州 西哈特福德 和
电气工程系耶鲁大学工程与应用科学学院 康涅狄格州 纽
黑文 |
| Stephen Shull | 帝国区电力公司 密苏里州 乔普林 |
| H. Jin Sim | 华凯萨电力系统公司 北卡罗莱纳州戈尔兹伯勒 |
| Robert F. Tillman Jr. | 南方公司服务公司 阿拉巴马州伯明翰市 |
| Karsten Viereck | MR 股份有限公司 德国雷根斯堡 |
| Loren B. Wagenaar | 瓦甘川斯咨询有限责任公司 俄亥俄州皮克林顿 |
| Alan L. Wilks | 顾问 田纳西州戴尔斯堡 |

目 录

译者序

原书前言

主编简介

参加编写人员

第1章 基本理论和原理	1
1.1 空心变压器	2
1.2 铁心或钢心变压器	2
1.3 铁心变压器的等效电路	4
1.4 实际变压器	8
参考文献	12
第2章 电力变压器	13
2.1 概述	13
2.2 额定值和等级分类	14
2.3 短路负载	16
2.4 效率、损耗和电压调节率	18
2.5 结构	19
2.6 附属设备	27
2.7 励磁涌流	29
2.8 发电机变压器	29
2.9 现在和未来的发展	30
参考文献	31
第3章 配电变压器	32
3.1 历史背景	33
3.2 结构	34
3.3 变压器基本结构	39
3.4 变压器连接	42
3.5 关于运行	45
3.6 变压器位置	47
3.7 架空配电变压器	49
3.8 地下配电变压器	49
3.9 垫式配电变压器	56
3.10 变压器损耗	62

3.11	变压器工作原理	64
3.12	变压器运行	67
3.13	变压器试验	68
3.14	变压器保护	69
3.15	经济运行	74
	参考文献	76
第4章	移相变压器	78
4.1	概述	78
4.2	基本原理	79
4.3	负载相量图	81
4.4	总的功率传输	82
4.5	移相变的分类	84
4.6	移相变设计方面的相关细节	89
4.7	有载分接开关的运用	91
4.8	其他方面的考虑	94
	参考文献	95
第5章	整流变压器	96
5.1	背景和历史回顾	97
5.2	新术语和定义	98
5.3	整流电路	99
5.4	整流阻抗	103
5.5	二次耦合	104
5.6	谐波的产生	106
5.7	谐波频谱	108
5.8	谐波电流对变压器的影响	110
5.9	热试验	113
5.10	谐波的消除	114
5.11	直流含量	118
5.12	由整流器/逆变器给变压器励磁	118
5.13	静电接地屏蔽	119
5.14	负载条件	119
5.15	相间变压器 (平衡电抗器)	119
5.16	整流变压器绝缘所承受的场强	120
5.17	整流变压器相关的短路问题	120
	参考文献	121
第6章	干式变压器	122
6.1	发展历史	122

6.2 变压器分接	123
6.3 干式变压器冷却方式	123
6.4 绕组绝缘系统	124
6.5 应用	125
6.6 外壳	125
6.7 运行条件	125
6.8 温升限值	127
6.9 变压器负载	128
6.10 附件	129
6.11 故障保护	129
6.12 冲击电压保护	129
6.13 谐波	130
6.14 干式变压器的维护	130
参考文献	131
第7章 互感器	133
7.1 概述	133
7.2 变压器基础	134
7.3 电压互感器	147
7.4 电流互感器	152
7.5 组合测量系统	165
7.6 光学传感器	166
参考文献	167
第8章 步进调压器	169
8.1 引言	169
8.2 在电力系统中的应用	171
8.3 额定参数	175
8.4 理论	177
8.5 用旁路避开调压器	183
8.6 三相调压器	187
8.7 调压器控制	189
8.8 特殊应用	193
参考文献	193
第9章 恒压变压器	195
9.1 背景	195
9.2 应用	202
9.3 采购考虑	211
9.4 典型的运行、储存和运输条件	213

9.5 铭牌数据和术语	214
9.6 新技术发展	214
9.7 补充内容	215
参考文献	218
第10章 风力涡轮发电机和光伏发电用变压器	219
10.1 新能源	219
10.2 风力涡轮发电机	225
10.3 风力涡轮发电机的输出	225
10.4 非正弦负载损耗的计算	227
10.5 公式和计算	228
10.6 分布光伏网络变压器 (DPV-GT) 并联方法比较	234
参考文献	237
第11章 电抗器	238
11.1 电抗器	238
11.2 背景和历史回顾	239
11.3 电抗器的应用	241
11.4 一些重要的应用因素	260
11.5 并联电抗器和合闸暂态过程	265
11.6 限流电抗器和合闸暂态过程	267
11.7 电抗器的损耗评价	270
11.8 降低品质因数	272
11.9 声级和声级的降低	275
11.10 线路陷波器、电力线载波通信、数据和继电保护系统	277
11.11 干式空心电抗器的安装	281
参考文献	287
第12章 绝缘介质	289
12.1 引言	289
12.2 液体绝缘: 油	289
12.3 液体绝缘: 其他绝缘液体	293
12.4 固体绝缘	293
12.5 污染	304
参考文献	305
第13章 电力套管	306
13.1 电力套管的使用目地	306
13.2 套管的分类	307
13.3 套管标准	311
13.4 重要的设计参数	312

13.5 套管的其他特征	316
13.6 套管的特殊应用	318
13.7 套管的常用附件	320
13.8 套管试验	322
13.9 维护和检修	326
参考文献	328
第14章 分接开关和智能控制	329
14.1 概述	330
14.2 无励磁分接开关	331
14.3 有载分接开关的转换原理	334
14.4 当前有载分接开关的设计理念	336
14.5 有载分接开关的应用	347
14.6 高压直流变压器	350
14.7 移相变压器	352
14.8 分接开关的额定参数和要求	354
14.9 有载分接开关的选择	356
14.10 非浸在矿物油中的分接开关	360
14.11 有载分接开关的保护装置	361
14.12 有载分接开关的维修	363
14.13 有载分接开关的整修和替换	364
14.14 有载分接开关智能化调节设备	364
14.15 变压器并联运行时有载分接开关控制的高级方法	369
14.16 自动检测开关系统拓扑的变压器并联运行	371
14.17 总结	373
参考文献	374
第15章 负载运行和热特性	376
15.1 IEEE 变压器温度及季节性额定容量建模分析方法指导	376
15.2 设计准则	388
15.3 铭牌	388
15.4 其他温升特性	389
15.5 热工况	390
15.6 温度测量	392
15.7 热响应的预测	393
15.8 变压器负载运行老化寿命理论	396
15.9 变压器负载运行时的含水量	397
15.10 负载运行推荐参数	399
参考文献	401

第16章 变压器连接	402
16.1 概述	402
16.2 单相变压器的极性	402
16.3 三相变压器的连接	403
16.4 常用特殊连接	412
参考文献	414
第17章 变压器试验	415
17.1 概述	415
17.2 电压比和联结组标号	418
17.3 绝缘特性	419
17.4 控制设备和控制电路	421
17.5 绝缘耐受	422
17.6 性能参数	430
17.7 其他试验	439
参考文献	441
第18章 有载分接开关控制和变压器并联运行	442
18.1 概述	442
18.2 系统观点, 单变压器	443
18.3 控制输入	443
18.4 电压调整的必要性	445
18.5 带功率因数校正电容器的有载分接开关控制	449
18.6 有载分接开关变压器和步进调压器的延展控制	450
18.7 有载分接开关变压器和步进调压器并联运行控制的介绍	452
18.8 定义并联运行程序	456
18.9 并联运行方法的比较	459
参考文献	464
第19章 电力变压器保护	466
19.1 简介	466
19.2 变压器差动保护	467
19.3 励磁涌流、过励磁和 CT 饱和	469
19.4 区分内部故障和涌流以及过励磁的方法	472
19.5 变压器保护的改进方法	479
19.6 电流差动继电器	481
19.7 在涌流条件下差动元素的性能	484
19.8 结论	491
参考文献	492
第20章 变压器声级产生的原因及影响	494
20.1 变压器噪声水平	494

20.2	声能测量技术	496
20.3	变压器的噪声源	498
20.4	变压器的噪声水平和测量标准	499
20.5	安装现场影响声级的因素	504
	参考文献	505
第 21 章	线圈和绕组的暂态过电压响应	507
21.1	暂态过电压要点	507
21.2	绕组中的涌流	509
21.3	确定暂态响应	512
21.4	谐振频率特性	516
21.5	电感模型	518
21.6	电容模型	520
21.7	损耗模型	523
21.8	绕组结构	526
21.9	系统研究模型	531
	参考文献	532
第 22 章	变压器的安装与维护	535
22.1	引言	536
22.2	验收	536
22.3	变压器的安装	539
22.4	变压器真空注油	543
22.5	验收试验	556
22.6	变压器运行	563
22.7	变压器维护	564
	参考文献	581
第 23 章	问题和故障调查	582
23.1	概述	582
23.2	背景调查	583
23.3	非变压器本身故障的问题分析	587
23.4	故障调查	590
23.5	信息分析	592
23.6	故障调查报告	598
23.7	特殊考虑	598
	参考文献	599
第 24 章	油浸式变压器的在线监测	601
24.1	在线监测的好处	601
24.2	在线监测系统	603
24.3	电力变压器铁心、绕组及绝缘系统上的应用	604