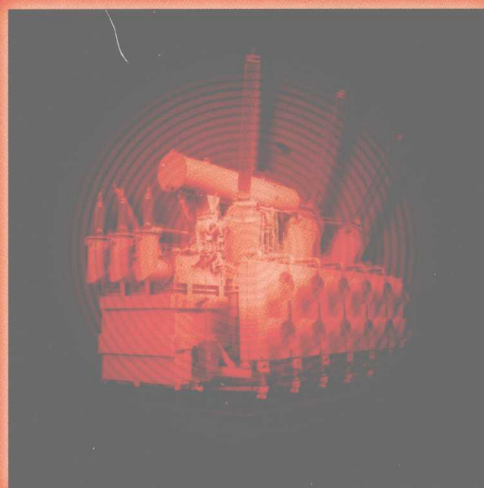


电力变压器手册

保定天威保变电气股份有限公司组编

谢毓城 主编

第 2 版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电力变压器手册

第2版

保定天威保变电气股份有限公司组编

谢毓城 主编
胡启凡 主审



机械工业出版社

本手册内容包括：电力变压器的基本概念和基本理论，变压器的短路阻抗、温升、短路强度和噪声等主要参数的论述和计算；变压器铁心、绕组、器身绝缘、引线绝缘、油箱及结构件的强度、刚度及主要部件所用的材料，各种结构性能特点、选择原则和有关的设计计算；电力变压器所用的分接开关、套管、冷却装置、测量和保护用的装置及仪器仪表等组件的国内外众多生产厂家的产品型号、性能；变压器的铁心、油箱、绝缘件、绕组和总装配等比较先进的加工方法及装备；变压器产品的主要试验项目、试验接线和方法；变压器的运输、安装和投运前的交接试验；特种变压器中的部分产品，对换流变压器、整流变压器和并联电抗器的基本概念、基本理论与电力变压器有显著不同部分做了介绍，在相关章节中也有所论述；最后还对变压器电磁场和瞬态电磁场数值分析基本原理和方法进行了概念性的介绍。

本手册是变压器安装、运行、维护人员以及制造厂设计和工艺技术人员不可缺少的得力工具，也可以作为大专院校有关专业师生的主要参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力变压器手册/谢毓城主编；保定天威保变电气股份有限公司组编.
—2 版. —北京：机械工业出版社，2014. 6
ISBN 978-7-111-46903-2

I. ①电… II. ①谢… ②保… III. ①电力变压器—技术手册
IV. ①TM41-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 109043 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：牛新国 责任编辑：牛新国 朱琳

责任校对：薛娜 封面设计：张静 责任印制：李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2014 年 6 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 71.25 印张 · 1747 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-46903-2

定价：298.00 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

第2版前言

《电力变压器手册》2003年出版发行,已经过去10年了。10年来电力变压器的制造技术有了长足的进步,有关标准也在不断更新和完善,变压器的容量越来越大,电压等级也越来越高,输电方式有了新的变化,特别是各种用途的特种变压器的需求也越来越旺盛。在新的情况下2003年版《电力变压器手册》的内容在一些方面显得有些陈旧和落后,因此保定天威保变电气股份有限公司组织原来写作人员和一部分现职技术人员共同承担了《电力变压器手册》的改版任务。

本手册内容充实、全面。内容包括1000kV级及以下的油浸式变压器、 $\pm 800\text{kV}$ 级及以下的油浸式换流变压器、500kV级并联电抗器和油浸式整流变压器的技术数据,变压器铁心、绕组、绝缘、油箱等部件的理论基础和设计计算;以及与之配套的组件,如套管、分接开关、冷却装置、油泵等技术数据、型号和规范;变压器用硅钢片、电磁线、绝缘材料、钢材以及其他辅助材料的规格、型号、技术性能数据等。本手册内容涉及变压器从订货、设计、制造、试验、包装、运输直至安装全过程。

本手册力求跟踪国内外变压器的发展动态,收集了大量国内外近几年来与之有关的各种资料,对变压器用导电、导磁、绝缘等材料以及产品的结构、组配件等最新技术进行了详细的介绍;根据现行的最新标准,在参考已有的手册内容的基础上补充了新的内容,技术上是先进的。

本手册在编写中注意对变压器的一些关键问题进行必要的理论分析,指出了应用的条件、范围和注意事项。各章节所列举的公式和数表,绝大多数是经过我公司或其他变压器制造厂家实践和验证过的,可以在实际工作中参考使用。

本手册对变压器制造行业制造出质量更好的变压器产品,以及对变压器产品进行全过程服务,使变压器发挥最大限度的效用具有很好的指导作用。

全手册共分17章。第1、4章由胡启凡教授级高级工程师编写及改版;第2、3、5章由董志刚高级工程师和张国强合写;第6章由张喜乐教授级高级工程师编写,由郭建贞教授级高级工程师改版;第7章由王晓莺工程师编写;第8、9、15章由谢毓城教授级高级工程师编写及改版;第10章由杨俊海教授级高级工程师编写及改版;第11章由杨俊海教授级高级工程师编写,由赵丽杰工程师做了部分补充;第12章由胡启凡教授级高级工程师编写,刘连兴高级工程师改

版；第13章由赵静月高级工程师、于新才高级工程师、康运和高级工程师、孙瑞田高级工程师、刘克昌高级工程师、李达全高级工程师等编写及改版，乔莲英高级工程师、杜卫杰工程师、韩彬工程师参与部分章节的改版；第14章由王雪刚教授级高级工程师编写及改版；原手册中的第16章删除，新编写的第16章16.1~16.3节分别由李文平教授级高级工程师、张亚杰教授级高级工程师、张俊杰高级工程师编写；第17章由王建民教授级高级工程师编写及改版。全手册由谢毓城教授级高级工程师担任主编，由胡启凡教授级高级工程师担任主审。

天威集团保定天威保变电气股份有限公司、天威集团保定天威特变电气股份有限公司和天威集团保定保菱变压器有限公司的领导和部门对本手册的编写和改版给予了大力支持和帮助，我们在此致以最深切的谢意。

限于我们的水平，书中不妥和错误之处在所难免，衷心地欢迎广大读者批评指正。

编者

第1版前言

为了适应我国电力变压器的电压等级和单台容量的不断提高,促进变压器产品的各种材料的发展和制造技术的不断进步;也为了满足广大从事变压器设计、制造、使用的工程技术人员和工人进一步提高技术水平的要求,天威集团保定天威保变电气股份有限公司结合几十年来变压器设计和制造的实践经验,组织编写了《电力变压器手册》。

本手册内容充实、全面。内容包括 500kV 级及以下的油浸式变压器的技术数据,变压器铁心、绕组、绝缘、油箱等部件的理论基础和设计计算;以及与之配套的组件,如套管、分接开关、冷却装置、油泵等技术数据、型号和规范;变压器用硅钢片、电磁线、绝缘材料、钢材以及其他辅助材料的规格、型号、技术性能数据等。本手册内容涉及变压器从订货、设计、制造、试验、包装、运输直至安装全过程。

本手册力求跟踪国内外变压器的发展动态,收集了大量国内外近几年来与之有关的各种资料,对变压器用导电、导磁、绝缘等材料以及产品的结构、组配件等最新技术进行了详细的介绍;根据现行的最新标准,在参考已有的手册内容的基础上,补充了新的内容,技术上是先进的。

本手册在编写中注意对变压器的一些关键问题进行必要的理论分析,指出了应用的条件、范围和注意事项。各章节所列举的公式和数表,绝大多数是经过我公司或其他变压器制造厂家实践和验证的,可以在实际工作中使用。

本手册对变压器制造行业制造出质量更好的变压器产品,以及对变压器产品进行全过程服务,使变压器产品发挥最大限度的效用具有很好的指导作用。

全书共分 17 章。第 1、4、12 章由胡启凡教授级高级工程师编写;第 2、3、5 章由董志刚高级工程师和张国强高级工程师合写;第 6 章由张喜乐高级工程师编写;第 7 章由王晓莺工程师编写;第 8、9、15、16 章由谢毓城教授级高级工程师编写;第 10、11 章由杨俊海高级工程师编写;第 13 章由赵静月高级工程师、于新才高级工程师、康运和工程师、孙瑞田工程师、李达全工程师、刘克昌工程师等编写;第 14 章由王雪刚高级工程师编写;第 17 章由王建民高级工程师编写。全书由谢毓城教授级高级工程师担任主编。由胡启凡教授级高级工程师担任主审。

天威集团保定天威保变电气股份有限公司的领导对本手册的编写给予了大

力的支持,天威集团保定天威保变电气股份有限公司的技术部、制造部、市场部对本手册的编写也给予很大的帮助,我们在此致以最深切的谢意。

限于我们的水平,书中不妥和错误之处在所难免,衷心地欢迎广大读者批评指正。

编者

目 录

第2版前言

第1版前言

第1章 概论..... 1

1.1 电力变压器在电力工业中的 地位和作用 1

1.1.1 电力变压器的发展历史..... 1

1.1.2 电力变压器在国民经济中的 作用 2

1.2 电力变压器的基本结构 3

1.2.1 铁心 3

1.2.1.1 晶粒取向电工钢带 3

1.2.1.2 非晶合金 4

1.2.2 绕组 5

1.2.2.1 导体材料 5

1.2.2.2 绕组结构 6

1.2.3 油浸式变压器油箱 6

1.2.4 变压器的热性能 7

1.2.5 变压器耐受短路的能力..... 8

1.2.5.1 变压器耐受短路的热稳定 能力 8

1.2.5.2 变压器耐受短路的动稳定 能力 9

1.2.5.3 变压器的短路试验 9

1.3 电力变压器按结构分类 11

1.3.1 心式变压器..... 11

1.3.2 壳式变压器..... 12

1.4 电力变压器按绝缘和冷却介质 分类 14

1.4.1 油浸式变压器 14

1.4.2 聚氯联苯绝缘变压器 15

1.4.3 充硅油变压器 15

1.4.4 β 油绝缘变压器 16

1.5 干式变压器 16

1.5.1 树脂型干式变压器 17

1.5.1.1 树脂加填料浇注 17

1.5.1.2 树脂浇注 17

1.5.1.3 树脂缠绕式 18

1.5.1.4 树脂真空压力浸渍 18

1.5.2 聚酰芳胺绝缘变压器 19

1.5.3 SF_6 气体绝缘变压器..... 20

1.5.3.1 SF_6 气体的绝缘性能 23

1.5.3.2 SF_6 气体的散热及变压器的 冷却 24

1.5.3.3 SF_6 气体绝缘变压器组件 25

1.5.3.4 SF_6 的温室效应问题 26

1.5.4 电缆型干式变压器 27

1.6 组合式变压器 29

1.7 电力变压器的型号和参数 29

1.7.1 电力变压器的型号 29

1.7.2 产品型号字母排列及涵义 30

1.7.3 三相油浸式电力变压器 损耗水平代号 32

1.7.4 标准 GB/T 6451—2008 35

1.7.4.1 6kV、10kV 电压等级 35

1.7.4.2 35kV 电压等级 37

1.7.4.3 66kV 电压等级 38

1.7.4.4 110kV 电压等级 39

1.7.4.5 220kV 电压等级 41

1.7.4.6 330kV 电压等级 45

1.7.4.7 500kV 电压等级 48

1.7.5 干式电力变压器损耗水平 代号 50

1.7.6 无励磁分接开关的型号 51

1.7.7 无励磁分接开关的型号字母 排列及涵义..... 52

1.7.8 有载分接开关的型号字母 排列及涵义..... 53

第2章 变压器的基本原理 55

2.1 变压器的工作原理 55

2.1.1 理想变压器的工作原理	55	4.2 变压器的损耗	73
2.1.2 变压器实际的工作状态	56	4.2.1 空载损耗	73
2.1.3 变压器的阻抗参数和 标么值	56	4.2.1.1 磁性钢片(硅钢片)材料	73
2.2 变压器的效率	58	4.2.1.2 我国磁性钢片标准	76
第3章 变压器短路阻抗与电压 调整率	59	4.2.1.3 取向钢片的损耗组成	76
3.1 引言	59	4.2.1.4 日本晶粒取向磁性钢带	78
3.2 高度相等磁动势均布的双绕组 心式变压器的短路阻抗计算	59	4.2.2 变压器的空载损耗	81
3.3 多绕组变压器的等效漏电抗 计算	62	4.2.2.1 铁心片材质	81
3.3.1 双绕组变压器	62	4.2.2.2 铁心的结构	82
3.3.1.1 高低高结构	62	4.2.2.3 铁心的接缝形式	82
3.3.1.2 高低低高结构	63	4.2.2.4 铁心叠积加工的影响	85
3.3.1.3 低高低高结构	64	4.2.2.5 取向磁性钢片的损耗系数	86
3.3.1.4 两绕组自耦结构	64	4.2.2.6 不同频率下的空载损耗	86
3.3.2 三绕组变压器	64	4.3 变压器的负载损耗	88
3.3.2.1 普通三绕组变压器	64	4.3.1 绕组的直流电阻损耗	88
3.3.2.2 三绕组自耦变压器	65	4.3.2 绕组导线在漏磁场中的 涡流损耗	88
3.3.2.3 中性点带调压绕组的 三绕组自耦变压器	66	4.3.3 并联导线内不平衡电流的 损耗	90
3.3.3 分裂变压器	66	4.3.4 引线的损耗	90
3.3.4 对称交叠式线圈漏电抗 计算	67	4.3.5 变压器油箱的损耗	91
3.4 短路漏抗的有限元计算方法的 主要公式	68	4.3.5.1 绕组漏磁通引起的油箱壁的 损耗	91
3.5 三相双绕组变压器的电压 调整率	69	4.3.5.2 不同材料的损耗	93
3.6 变压器的并联运行	69	4.3.5.3 磁屏蔽	93
3.6.1 三相联结组和相位关系 配合	70	4.3.5.4 电磁屏蔽	95
3.6.2 电压比的差异及环流	71	4.3.5.5 大电流引线在油箱壁产生的 损耗	95
3.6.3 短路阻抗不相等的变压器的 并联运行	71	4.3.5.6 套管电流在开孔箱盖中的 损耗	95
3.6.4 并联运行的其他技术内容	72	4.3.6 铁心拉板的损耗	97
第4章 变压器的损耗和温升	73	4.3.7 冷却装置的损耗	99
4.1 概述	73	4.3.7.1 风扇的损耗	99
		4.3.7.2 油泵的损耗	99
		4.4 油浸式变压器的温升	99
		4.4.1 变压器的温升和温度	99
		4.4.1.1 标准规定	100
		4.4.1.2 绝缘材料的老化	101
		4.4.1.3 加权环境温度	102
		4.4.2 变压器的发热和冷却	103
		4.4.2.1 变压器的散热方式	103
		4.4.2.2 变压器的冷却方式	107

4.4.3 油浸式变压器的发热和冷却	112
4.4.4 油浸式变压器绕组的温升	115
4.4.4.1 绕组内的油流	115
4.4.4.2 绕组温升的工程计算方法	116
4.4.5 变压器油箱的散热	119
4.4.5.1 对流散热	119
4.4.5.2 辐射	120
4.4.6 管式变压器油箱的温升	121
4.5 变压器油温升的工厂算法	122
4.5.1 变压器油箱的有效散热面积	122
4.5.1.1 管式油箱	122
4.5.1.2 波纹油箱	122
4.5.1.3 带散热器的油箱	123
4.5.2 油浸自冷和风冷变压器的油顶层温升计算	125
4.5.3 强油风冷(水冷)式变压器的油温升	126
4.6 铁心的温升	127
4.6.1 铁心内最热点相对铁心表面的温升	128
4.6.2 铁心表面对变压器油的温升	128
4.7 变压器的短路温升	129
4.8 日光辐射对变压器温升的影响	130
4.9 干式变压器的温升	132
4.9.1 非树脂型干式变压器的温升	133
4.9.1.1 非树脂型干式变压器的散热面	133
4.9.1.2 非树脂型干式变压器的热负荷	137
4.9.1.3 非树脂型干式变压器的温升	138
4.9.2 树脂型干式变压器的温升	139
4.9.2.1 树脂型干式变压器铁心的温升	139
4.9.2.2 树脂型干式变压器绕组的温升	139

第5章 变压器的短路力和短路强度

140

5.1 引言	140
5.2 变压器的短路电流计算	140
5.2.1 三相稳态短路电流计算	140
5.2.2 瞬变短路电流	141
5.2.3 变压器的三相非对称短路	143
5.2.4 中性点接地的三相三绕组变压器的短路电流计算	144
5.2.4.1 系统Ⅱ单相接地故障的短路电流计算	145
5.2.4.2 系统Ⅰ单相接地故障的短路电流计算	147
5.2.4.3 系统Ⅱ两相接地故障的短路电流计算	148
5.2.4.4 系统Ⅰ两相接地故障的短路电流计算	150
5.2.4.5 三相短路时绕组Ⅲ的短路电流计算	152
5.3 变压器漏磁通分布与短路力的关系	153
5.3.1 双绕组变压器漏磁分布的特点	154
5.3.2 不平衡安匝产生的辐向漏磁通	155
5.3.3 磁场中心不在同一高度时的辐向漏磁通	156
5.3.4 三绕组变压器的漏磁通分布	156
5.4 动态短路力与静态短路力	157
5.4.1 短路力是动态力而不是静态力	157
5.4.2 动态短路力的频率	158
5.4.3 用静态的方法计算动态短路力的先决条件	158
5.4.4 短路力的静态计算方法	158
5.4.5 绕组的固有振动频率	159
5.4.6 短路力的动态计算	159
5.4.7 轴向预压紧力的选取原则	160

5.4.8 短路力的超静定计算	160	5.7.2 在计算绕组辐向稳定性时 必须考虑的主要问题	172
5.5 绕组受力情况分析	160	5.7.3 绕组辐向失稳平均临界 应力的计算方法	172
5.5.1 短路力作用方向的判断 原则	160	5.7.3.1 国际大电网会议论文中 经常采用的计算公式	172
5.5.2 三相双绕组变压器受力情况 分析	161	5.7.3.2 前苏联经常采用的计算 公式	173
5.5.2.1 轴向漏磁分量产生的辐向 短路力	161	5.7.3.3 日本变压器专业委员会 推荐的计算方法	174
5.5.2.2 磁力线在绕组端部弯曲 产生的轴向短路力	164	5.7.3.4 波兰电工协会的研究结论 ..	176
5.5.2.3 安匝不平衡产生的轴向 短路力	165	5.7.4 提高绕组辐向稳定性的 主要技术措施	176
5.5.2.4 磁场中心不在同一高度上 产生的轴向短路力	167	5.8 绕组轴向失稳的分析与计算	177
5.5.2.5 绕组的轴向预压紧力必须 始终大于轴向短路力的 合力	167	5.8.1 绕组轴向失稳的机理	177
5.5.2.6 辐向漏磁分量引起的周向 旋转短路力	167	5.8.2 造成轴向失稳的主要原因 ..	177
5.5.2.7 辐向漏磁分量引起的相间 短路力	168	5.8.2.1 轴向预压紧力不够是导致 轴向失稳的主要原因 之一	177
5.5.3 三相三绕组变压器的受力 情况分析	168	5.8.2.2 垫块的残余(永久)变形 是导致轴向失稳的主要 原因之二	178
5.5.3.1 三相三绕组变压器的辐向 短路力	168	5.8.2.3 当绕组的某一固有频率与 轴向短路力的频率相接 近时会产生谐振	178
5.5.3.2 三相三绕组变压器的轴向 短路力	168	5.8.3 轴向失稳的计算	179
5.5.4 受辐向压缩力与拉伸力 作用的不同绕组的 受力情况比较	169	5.8.4 提高绕组轴向稳定性的主要 措施	180
5.6 绕组损坏的主要模式	169	5.8.4.1 准确地选取与保持足够的 轴向预压紧力	181
5.6.1 绕组变形导致匝绝缘破裂 从而引起匝间短路	169	5.8.4.2 垫块处理	181
5.6.2 绕组变形导致主绝缘强度 降低进而造成绝缘击穿	170	5.8.4.3 绕组恒压干燥处理	181
5.6.3 绕组的辐向失稳	170	5.8.4.4 总装配时轴向预压紧力的 准确控制	182
5.6.4 绕组的轴向失稳	170	5.9 提高绕组抗短路能力应采取的 主要技术措施	182
5.7 绕组辐向失稳的分析计算	171	5.9.1 设计计算方面	182
5.7.1 造成绕组辐向失稳的主要 原因	171	5.9.2 制造工艺方面	183
		5.9.2.1 绝缘件制造方面	183
		5.9.2.2 绕组绕制方面	183
		5.9.2.3 器身装配与整体套装方面 ..	183
		5.10 绕组变形的测量	184

5.11 变压器短路强度的计算验证	184
5.12 短路力计算的有限元方法的主要公式	185
5.12.1 静态短路力计算	185
5.12.2 动态短路力计算	186
5.12.3 绕组短路机械强度计算	187
5.12.3.1 轴向弯曲应力	187
5.12.3.2 由纵向漏磁通产生的外绕组所受的抗拉应力	187
5.12.3.3 由纵向漏磁通产生的内绕组的压应力和弯曲变形	188
5.13 结束语	188
第6章 变压器噪声	190
6.1 变压器噪声的来源	190
6.1.1 变压器本体噪声	190
6.1.2 冷却装置的噪声	191
6.2 变压器噪声的传播路径	191
6.3 变压器噪声的度量	191
6.3.1 声压级	191
6.3.2 声强级	192
6.3.3 声功率级	192
6.3.4 响度级和等响度曲线	192
6.3.5 变压器噪声以 A 计权方式度量	193
6.4 影响变压器噪声的因素	193
6.4.1 硅钢片的磁致伸缩对噪声的影响	193
6.4.2 铁心结构对噪声的影响	194
6.4.3 铁心装配工艺对噪声的影响	195
6.4.4 谐振对噪声的影响	195
6.5 降低变压器噪声的措施	195
6.5.1 降低本体噪声	195
6.5.1.1 降低铁心噪声	195
6.5.1.2 降低油箱及其结构件噪声	196
6.5.2 降低冷却装置噪声	197
6.5.2.1 降低冷却风扇噪声	197
6.5.2.2 降低自冷式散热器噪声	197
6.5.2.3 降低油泵噪声	197
6.5.3 在传播路径上采取隔声措施	197
6.5.4 在传播路径上采取消声措施	197
6.6 变压器噪声的设计计算	198
6.6.1 变压器本体噪声的计算	198
6.6.1.1 自冷式变压器本体噪声	198
6.6.1.2 变压器噪声在空气中的衰减	198
6.6.2 冷却装置噪声的计算	199
6.6.3 变压器噪声的计算	199
6.6.4 铁心固有频率的计算	199
6.6.5 高效隔声板的降噪计算	200
6.6.5.1 高效隔声板的基本结构	200
6.6.5.2 高效隔声板隔声量的计算	200
6.7 变压器噪声的测定	201
6.7.1 测定方法的选择	201
6.7.2 测量仪器的校准	201
6.7.3 被测变压器试验时的负载状态	201
6.7.4 测量位置	202
6.7.5 声压法	203
6.7.5.1 测量环境	203
6.7.5.2 测量环境修正值 K 的确定	203
6.7.5.3 被试变压器的运行状态	204
6.7.5.4 平均声压级的计算	204
6.7.6 声强法	205
6.7.6.1 测量环境	205
6.7.6.2 被试变压器的运行状态	205
6.7.6.3 平均声强级的计算	205
6.7.7 声功率级的计算	205
6.7.8 变压器额定负载状态时的声功率级	206
6.8 变压器声级	206
第7章 铁心	208
7.1 概述	208
7.2 变压器铁心材料	208
7.2.1 热轧磁性钢片	210
7.2.2 冷轧晶粒取向磁性钢片	210

7.2.3 非晶合金材料	212	7.5 联结组标号与铁心空载性能	236
7.3 变压器铁心结构	213	7.6 励磁涌流	237
7.3.1 心式变压器铁心	213	7.7 噪声	239
7.3.1.1 心式变压器铁心叠片图	214	7.7.1 变压器产生噪声的原因	239
7.3.1.2 心式变压器夹件	217	7.7.2 影响变压器噪声大小的 几个因素	240
7.3.1.3 铁心拉板	219	7.7.2.1 变压器噪声和磁性钢片品种 及铁心磁通密度的关系	240
7.3.1.4 铁心柱绑扎带	220	7.7.2.2 变压器噪声级和铁心 夹紧力的关系	240
7.3.1.5 铁心的绝缘	221	附录 7.A 广东海鸿变压器有限公司 立体卷铁心介绍	242
7.3.1.6 铁心的冷却油道	221	第 8 章 绕组	244
7.3.1.7 铁心的接地	222	8.1 导体	244
7.3.2 壳式变压器铁心	223	8.1.1 常规导体材料铜和铝	244
7.3.2.1 壳式变压器铁心叠片图	223	8.1.2 高温超导材料	246
7.3.2.2 壳式变压器铁心的夹紧	224	8.2 绕组用导线	247
7.3.2.3 壳式变压器铁心油道和 叠片绝缘	224	8.2.1 圆导线	247
7.3.3 卷铁心	225	8.2.2 扁导线	248
7.3.3.1 单相卷铁心	225	8.2.3 组合导线	251
7.3.3.2 三相卷铁心	225	8.2.4 换位导线	251
7.4 铁心性能参数	226	8.3 绕组的分类与结构	252
7.4.1 铁心的空载损耗	226	8.3.1 变压器绕组结构的一般性 介绍	252
7.4.2 铁心的空载电流	227	8.3.1.1 绕组的绕向	252
7.4.3 铁心的制造工艺对空载 性能的影响	227	8.3.1.2 绕组的连接图和联结组	255
7.4.3.1 磁性钢片变形和机械应力 对空载损耗的影响	227	8.3.1.3 绕组中的换位	256
7.4.3.2 铁心片毛刺和绝缘损伤与 空载性能	227	8.3.1.4 绕组中的绝缘	265
7.4.3.3 铁心冲孔对空载损耗的 影响	227	8.3.2 变压器绕组结构的分类	266
7.4.3.4 铁心接缝尺寸对空载损耗的 影响	228	8.3.2.1 层式绕组	266
7.4.4 铁心设计对空载损耗的 影响	228	8.3.2.2 饼式绕组	269
7.4.4.1 铁心叠片图对空载损耗的 影响	228	第 9 章 变压器器身绝缘及 引线绝缘	283
7.4.4.2 每叠片数与空载性能	230	9.1 变压器的主要绝缘材料及其绝缘 特性	283
7.4.4.3 交错接缝和阶梯接缝的空载 损耗	231	9.1.1 液体绝缘材料	283
7.4.4.4 铁心截面形状对空载损耗的 影响	234	9.1.1.1 变压器油	283
7.4.5 晶粒取向磁性钢片铁心的 损耗系数	236	9.1.1.2 α 油、 β 油	291

9.1.1.3 复敏绝缘液体	293	9.4.4.1 高压为 40kV 及以下电压等级 变压器器身绝缘典型结构 ...	327
9.1.1.4 聚氯联苯	293	9.4.4.2 高压为 66kV 级的器身 绝缘	329
9.1.1.5 硅油	293	9.4.4.3 高压为 110kV 级的器身 绝缘	329
9.1.2 气体绝缘材料	296	9.4.4.4 高压为 220kV 级的器身 绝缘	331
9.1.2.1 空气	296	9.5 变压器的纵绝缘	333
9.1.2.2 SF ₆ 气体	297	9.5.1 工频电压、雷电冲击电压、 操作冲击电压在变压器 绕组上的分布	333
9.1.3 固体绝缘材料	299	9.5.1.1 变压器上的作用电压的 种类	333
9.1.3.1 绝缘纸、绝缘纸板和 纸制品	299	9.5.1.2 几种不同类型电压的波形和 在绕组上的电压分布	334
9.1.3.2 木材和木制品	313	9.5.2 变压器绕组结构的选择	350
9.1.3.3 胶纸板、胶布板、胶纸管、 胶布管	314	9.5.3 变压器绕组纵绝缘的设计 ...	355
9.1.3.4 纤维制品	317	9.5.3.1 不同电压等级的变压器 绕组的结构型式的选择	355
9.1.3.5 化学制品	318	9.5.3.2 匝绝缘和匝绝缘与油道绝缘 配合的冲击绝缘强度的 校核	356
9.1.4 油、纸绝缘结构	319	9.6 变压器的局部放电	357
9.1.4.1 覆盖	319	9.6.1 引起变压器局部放电的 原因	357
9.1.4.2 绝缘层	319	9.6.2 无局部放电变压器的 设计与工艺制造	360
9.1.4.3 绝缘隔板	319	9.7 变压器工频感应和外施耐压 试验时的绝缘特性	361
9.2 变压器的绝缘水平	320	9.7.1 工频电压作用下变压器 绝缘系统的绝缘特性	361
9.2.1 变压器绕组及引出线的 绝缘水平	320	9.7.2 工频电压作用下变压器 绝缘结构中采取的对策	362
9.2.2 变压器套管对地和套管 之间的空气间隙	322	9.7.2.1 绝缘材料的选择	362
9.2.2.1 $U_m < 170kV$ 的绕组	322	9.7.2.2 充分利用提高变压器油的 放电特性的一切手段	362
9.2.2.2 中性点套管带电部分的 对地空气间隙	322	9.7.2.3 提高沿面放电的措施	362
9.2.2.3 $U_m \geq 170kV$ 的绕组	322	9.8 变压器中其他典型结构的 电场	363
9.3 变压器内、外部的典型电场和 典型绝缘结构	323	9.8.1 变压器的端绝缘	363
9.3.1 变压器中绝缘的分类	323		
9.3.2 变压器内部的典型电场	324		
9.3.3 变压器内部的典型绝缘 结构	324		
9.3.4 变压器外部电场	325		
9.4 变压器的主绝缘	325		
9.4.1 变压器主绝缘结构的选择 原则	325		
9.4.2 变压器的主绝缘结构	325		
9.4.3 变压器主绝缘结构的发展 前景	327		
9.4.4 变压器器身绝缘典型结构 ...	327		

9.8.1.1	变压器端部电场的描述	363	10.2.1	6kV、10kV 电压等级 变压器	388
9.8.1.2	变压器端部电场的基本 结构	363	10.2.2	35kV 电压等级变压器	390
9.8.2	变压器的引线绝缘	365	10.2.3	66kV 电压等级变压器	391
9.8.2.1	变压器引线的选择	365	10.2.4	110kV 电压等级变压器	393
9.8.2.2	变压器引线绝缘	371	10.2.5	220kV 电压等级变压器	394
9.8.2.3	变压器引线绝缘距离	373	10.2.6	330kV 电压等级变压器	396
9.9	变压器绝缘表面的沿面放电	379	10.2.7	500kV 电压等级变压器	397
9.9.1	引起变压器绝缘表面沿面 放电的结构原因	379	10.2.8	$\pm 500\text{kV}$ 及以下电压等级 换流变压器	398
9.9.2	引起变压器绝缘表面沿面 放电的因素	381	10.2.9	330kV 及 500kV 电压等级 并联电抗器	399
9.9.3	防止变压器绝缘表面发生 沿面放电的对策和措施	381	10.3	油箱的分类与结构	400
9.10	快速瞬态过电压	384	10.3.1	油箱的分类	400
9.10.1	快速瞬态过电压的 产生和特点	384	10.3.1.1	按冷却方式进行分类	400
9.10.1.1	快速瞬态过电压的 产生过程	384	10.3.1.2	按油箱外形进行分类	402
9.10.1.2	快速瞬态过电压的特点	384	10.3.2	常用油箱的结构	403
9.10.2	快速瞬态过电压对变压器 绝缘的影响	384	10.3.2.1	中小型变压器油箱	403
9.10.2.1	快速瞬态过电压的 最大幅值	384	10.3.2.2	大型变压器油箱	406
9.10.2.2	快速瞬态过电压作用在 变压器上时的电压 分布情况	385	10.4	油箱结构设计要点	413
9.10.3	快速瞬态过电压作用下 变压器绕组上应 采取的措施	385	10.4.1	箱沿结构	413
附录 9. A	不同电极形状及操作方法 对变压器油击穿电压 测定值的影响	385	10.4.2	吊攀结构	414
附录 9. B	计算式 (9-39) 和式 (9-40) 中系数 ϕ 求取时所用的 附图	387	10.4.3	法兰连接结构	415
第 10 章	变压器油箱	388	10.4.4	变压器的密封	417
10.1	概述	388	10.4.4.1	密封的基本知识	417
10.2	对变压器油箱的基本要求	388	10.4.4.2	密封结构的设计	418
			10.4.4.3	变压器密封的特点	420
			10.4.5	油箱的器身定位结构	422
			10.4.5.1	器身的下部定位结构	422
			10.4.5.2	器身的上部定位结构	422
			10.4.6	强油导向冷却时的导油 结构	423
			10.4.6.1	利用下夹件进行导油	423
			10.4.6.2	利用导油管进行导油	423
			10.4.6.3	箱底导油结构	424
			10.4.7	油箱磁屏蔽	424
			10.4.7.1	油箱磁屏蔽的结构	424
			10.4.7.2	油箱磁屏蔽的设计	425
			10.4.8	油箱电磁屏蔽	426
			10.4.8.1	油箱电磁屏蔽与磁屏蔽的 比较	426
			10.4.8.2	油箱电磁屏蔽的结构	426

10.4.9 油箱的隔声降噪结构	427	11.1.1 变压器内部器身结构 简介	446
10.4.9.1 变压器本体噪声的产生 机理	427	11.1.1.1 铁心磁路结构	446
10.4.9.2 油箱降噪的技术措施	427	11.1.1.2 铁心夹紧结构	446
10.4.9.3 隔声技术措施	428	11.1.2 绑扎铁心结构的结构件 力学性能分析	449
10.4.10 套管升高座及管接头的 设计	428	11.1.2.1 力学分析的基本假设	451
10.4.10.1 利用套管升高座旋转 保证外绝缘距离	428	11.1.2.2 铁心柱叠片绑扎力所对应 相关结构件的机械 强度计算	452
10.4.10.2 斜升高座的设计	429	11.1.2.3 铁心拉板及其相关件的 机械强度计算	453
10.4.10.3 斜管接头的设计	431	11.1.2.4 铁轭夹件的机械强度 计算	457
10.4.10.4 箱壁端部圆弧形、顶盖梯形 的油箱上所用套管升高 座壁展开尺寸的计算	431	11.1.2.5 铁轭拉带的应力计算	464
10.4.11 油箱设计的注意问题	433	11.1.2.6 上铁轭撑板的应力与 变形计算	466
10.5 变压器油箱耐压力学性能 分析与计算	434	11.1.2.7 器身垫脚的机械强度 计算	467
10.5.1 油箱力学性能简化计算的 传统解析方法	434	11.1.2.8 下定位钉及上部定位件 焊缝的应力计算	469
10.5.1.1 箱壁力学性能计算	434	11.1.2.9 器身上部压板及下部托板的 应力计算	470
10.5.1.2 各种加强铁的强度估算	437	11.1.3 螺杆夹紧铁轭结构的机械 强度计算	471
10.5.1.3 箱沿密封部件的机械强度 计算	439	11.1.3.1 铁心叠片的夹紧力	472
10.5.1.4 箱底的机械强度计算	440	11.1.3.2 铁心柱绑扎带的绑扎厚度 计算	473
10.5.1.5 盖板的应力与挠度	440	11.1.3.3 三相三柱铁心结构机械 强度计算	474
10.5.1.6 箱壁及其加强铁力学 性能的计算举例	441	11.1.3.4 三相五柱铁心结构机械 强度计算	477
10.5.2 油箱耐压力学特性的计算机 分析与结构优化设计	442	11.1.3.5 器身压钉的机械强度 计算	480
10.5.2.1 油箱耐压力学特性的 计算机分析	442	11.1.3.6 下夹件上肢板的机械强度 计算	482
10.5.2.2 油箱结构的优化设计	442	11.2 变压器抗地震性能分析	482
10.5.3 油箱耐压试验的失效形式与 材料的许用应力	444	11.2.1 与地震有关的常用术语 解释	483
10.5.3.1 油箱耐压试验的失效 形式	444	11.2.2 地震时变压器的破坏 形式	486
10.5.3.2 油箱材料的许用应力	444	11.2.2.1 动态损坏	487
10.5.4 油箱加强铁的结构	445		
第11章 变压器结构件设计与 力学性能分析	446		
11.1 变压器内部结构件及其力 学性能分析	446		

11.2.2.2 静态损坏	487	12.1.2.7 上海华明生产的有载 分接开关	540
11.2.2.3 保护装置误动作	487	12.1.2.8 ABB 生产的有载 分接开关	545
11.2.3 变压器的抗震计算	487	12.2 套管	549
11.2.3.1 变压器本体的抗震能力 计算	488	12.2.1 套管的型号表示	550
11.2.3.2 变压器套管的抗震能力 计算	489	12.2.2 套管的技术要求	550
11.3 变压器结构件的计算机数值 分析	493	12.2.2.1 套管的试验电压	550
11.3.1 Pro/MECHANICA 应用软件 介绍	493	12.2.2.2 套管的介质损耗角正切和 电容量	550
11.3.2 Pro/MECHANICA 软件的 分析应用工作流程	493	12.2.2.3 套管的局部放电量及 无线电干扰	553
11.3.3 计算实例	494	12.2.2.4 套管测量端子、电压抽头的 电容、介质损耗角正切和 工频耐受电压试验	553
11.3.3.1 建立模型	494	12.2.2.5 套管的热稳定性能	553
11.3.3.2 对模型进行预处理	495	12.2.2.6 套管各部位的发热温度和 温升	553
11.3.3.3 分析模型	497	12.2.2.7 套管的密封性能	555
11.3.3.4 对模型后处理	498	12.2.2.8 套管的悬壁耐受负荷	555
11.3.4 结论	498	12.2.2.9 套管耐受的热短时电流	555
第12章 变压器组件	500	12.2.3 套管的分类	557
12.1 分接开关	500	12.2.4 典型套管的结构	558
12.1.1 无励磁分接开关	500	12.2.4.1 复合瓷绝缘导杆式套管	558
12.1.1.1 无励磁分接开关的性能 要求	500	12.2.4.2 单体瓷绝缘导杆式套管	559
12.1.1.2 无励磁分接开关的型号	500	12.2.4.3 有附加绝缘导杆式套管	561
12.1.1.3 无励磁分接开关的结构 形式	502	12.2.4.4 35kV 级穿缆式套管	561
12.1.1.4 无励磁分接开关的分接 布置	505	12.2.4.5 35kV 级大电流套管	564
12.1.2 有载分接开关	505	12.2.4.6 60~550kV 电容式套管	570
12.1.2.1 有载分接开关的有关 定义	507	12.2.4.7 硅橡胶绝缘套管	575
12.1.2.2 有载分接开关的技术 要求	509	12.2.4.8 特高压变压器套管	575
12.1.2.3 有载分接开关电动机构的 技术要求	512	12.2.4.9 环氧浸纸高压和超高压 套管	579
12.1.2.4 有载分接开关的型号及 技术数据	513	12.3 冷却器	609
12.1.2.5 MR 典型产品	516	12.3.1 风冷却器	609
12.1.2.6 贵州长征生产的有载 分接开关	531	12.3.1.1 风冷却器的额定冷却 容量	609
		12.3.1.2 技术要求	609
		12.3.1.3 风冷却器的结构	610
		12.3.1.4 风扇	612
		12.3.1.5 油泵	615
		12.3.1.6 油流继电器	619