

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



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

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



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



● ISBN 7-111-11082-X/TM-1007

封面设计 / 电脑制作 : 姚毅

ISBN 7-111-11082-X



9 787111 110828 >

定价: 118.00 元

地址: 北京市百万庄大街22号 邮政编码: 100037
联系电话: (010) 68326294 网址: <http://www.cmpbook.com>
E-mail: online@cmpbook.com

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



机械工业出版社

本手册介绍了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，有关变压器订货合同的技术规范；最后还对变压器电磁场数值分析基本原理和方法进行了概论性的介绍。

本手册是变压器安装、运行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. —北京：机械工业出版社，2003.1
ISBN 7-111-11082-X

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 086298 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：周 娟 版式设计：冉晓华 责任校对：李秋荣 张 媛

封面设计：姚 毅 责任印制：路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm¹/₁₆ · 63.5 印张 · 3 插页 · 1579 千字

0 001—5 000 册

定价：118.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

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

Ⅳ

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

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 8

1.2.5 变压器耐受短路的能力 9

1.2.5.1 变压器耐受短路的热稳定能 力 9

1.2.5.2 变压器耐受短路的动稳定能 力 10

1.2.5.3 变压器的短路试验 10

1.3 电力变压器按结构分类 12

1.3.1 心式变压器 12

1.3.2 壳式变压器 13

1.4 电力变压器按绝缘和冷却介质 分类 15

1.4.1 油浸式变压器 15

1.4.2 聚氯联苯绝缘变压器 16

1.4.3 充硅油变压器 16

1.4.4 β 油绝缘变压器 17

1.5 干式变压器 17

1.5.1 树脂型干式变压器 18

1.5.1.1 树脂加填料浇注 18

1.5.1.2 树脂浇注 19

1.5.1.3 树脂缠绕式 19

1.5.1.4 树脂真空压力浸渍 19

1.5.2 聚酰芳胺绝缘变压器 20

1.5.3 SF₆ 气体绝缘变压器 21

1.5.3.1 SF₆ 气体的绝缘性能 23

1.5.3.2 SF₆ 气体的散热及变压器的冷 却 25

1.5.3.3 SF₆ 气体绝缘变压器组件 27

1.5.3.4 SF₆ 的温室效应问题 27

1.5.4 电缆型干式变压器 29

1.6 变压器按调压方式分类 31

1.7 组合式变压器 31

1.8 电力变压器的参数和有关标 准 32

1.8.1 电力变压器的有关标准 32

1.8.2 变压器型号表示方法中符 号代表的意义 32

1.8.3 电力变压器的重要参数 34

1.8.3.1 额定容量 34

1.8.3.2 绕组的额定电压 34

1.8.3.3 额定电压比 35

1.8.3.4 绝缘水平 35

1.8.3.5 空载损耗和空载电流 35

1.8.3.6 负载损耗和短路阻抗 35

1.8.3.7 总损耗 35

1.8.3.8 零序阻抗 35

1.8.3.9 变压器油温升 35

1.8.3.10 变压器绕组温升 35

1.8.3.11 绕组联结组标号 35

1.9 变压器的选用、主要性能参数 与制造成本的关系 36

1.9.1 性能参数对成本的影响 36

1.9.1.1 短路阻抗 36

1.9.1.2 负载损耗 36

1.9.1.3 空载损耗 37

1.9.1.4 声级水平	37	率	70
1.9.1.5 变压器的容量、重量、尺寸 和性能之间的关系	37	3.6 变压器的并联运行	70
1.9.2 变压器的损耗评价	37	3.6.1 三相联结组和相位关系配 合	71
1.9.3 油浸式电力变压器的性能标 准	38	3.6.2 电压比的差异及环流	72
1.9.4 干式电力变压器的性能标 准	51	3.6.3 短路阻抗不相等的变压器 的并联运行	72
第2章 变压器的基本原理	56	3.6.4 并联运行的其他技术内 容	73
2.1 变压器的工作原理	56	第4章 变压器的损耗和温升	74
2.1.1 理想变压器的工作原理	56	4.1 概述	74
2.1.2 变压器实际的工作状态	57	4.2 变压器的损耗	74
2.1.3 变压器的阻抗参数和标么 值	58	4.2.1 空载损耗	74
2.2 变压器的效率	59	4.2.1.1 磁性钢片(硅钢片)材料	74
第3章 变压器短路阻抗与电压 调整率	60	4.2.1.2 我国磁性钢片标准	76
3.1 引言	60	4.2.1.3 日本晶粒取向磁性钢带	79
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	60	4.2.2 变压器的空载损耗	83
3.3 多绕组变压器的等效漏电抗计 算	63	4.2.2.1 铁心片材质	83
3.3.1 双绕组变压器	63	4.2.2.2 铁心的结构	83
3.3.1.1 高低高结构	63	4.2.2.3 铁心的接缝形式	84
3.3.1.2 高低低高结构	64	4.2.2.4 铁心叠积加工的影响	86
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	65	4.2.2.6 不同频率下的空载损耗	87
3.3.2 三绕组变压器	65	4.3 变压器的负载损耗	88
3.3.2.1 普通三绕组变压器	65	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	66	4.3.2 绕组导线在漏磁场中的涡 流损耗	89
3.3.2.3 中性点带调压绕组的三绕组 自耦变压器	67	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	67	4.3.4 引线的损耗	91
3.3.4 对称交错式绕组漏电抗计 算	68	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	69	4.3.5.1 绕组漏磁通引起的油箱壁的 损耗	92
3.5 三相双绕组变压器的电压调整		4.3.5.2 不同材料的损耗	93
		4.3.5.3 磁屏蔽	94
		4.3.5.4 电磁屏蔽	95
		4.3.5.5 大电流引线在油箱壁产生的 损耗	96
		4.3.5.6 套管电流在开孔箱盖中的	

损耗	96	4.8 日光辐射对变压器温升的 影响	131
4.3.6 铁心拉板的损耗	98	4.9 干式变压器的温升	133
4.3.7 冷却装置的损耗	100	4.9.1 非树脂型干式变压器的温 升	135
4.3.7.1 风扇的损耗	100	4.9.1.1 非树脂型干式变压器的散 热面	135
4.3.7.2 油泵的损耗	100	4.9.1.2 非树脂型干式变压器的热 负荷	139
4.4 油浸式变压器的温升	100	4.9.1.3 非树脂型干式变压器的 温升	139
4.4.1 变压器的温升和温度	100	4.9.2 树脂型干式变压器的温 升	140
4.4.1.1 标准规定	100	4.9.2.1 树脂型干式变压器铁心的 温升	140
4.4.1.2 绝缘材料的老化	102	4.9.2.2 树脂型干式变压器绕组的 温升	140
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	108		
4.4.3 油浸式变压器的发热和 冷却	113		
4.4.4 油浸式变压器绕组的温 升	116		
4.4.4.1 绕组内的油流	116		
4.4.4.2 绕组温升的工程计算方 法	117		
4.4.5 变压器油箱的散热	120		
4.4.5.1 对流散热	120		
4.4.5.2 辐射	121		
4.4.6 管式变压器油箱的温升	122		
4.5 变压器油温升的工厂算法	123		
4.5.1 变压器油箱的有效散热 面积	123		
4.5.1.1 管式油箱	123		
4.5.1.2 波纹油箱	123		
4.5.1.3 带散热器的油箱	124		
4.5.2 油浸自冷和风冷变压器 的油顶层温升计算	126		
4.5.3 强油风冷(水冷)式变压 器的油温升	127		
4.6 铁心的温升	128		
4.6.1 铁心内最热点相对铁心 表面的温升	129		
4.6.2 铁心表面对变压器油的温 升	129		
4.7 变压器的短路温升	130		
		第5章 变压器的短路力和短路 强度	142
		5.1 引言	142
		5.2 变压器的短路电流计算	142
		5.2.1 三相稳态短路电流计算	142
		5.2.2 瞬变短路电流	143
		5.2.3 变压器的三相非对称短 路	145
		5.2.4 中性点接地的三相三绕组 变压器的短路电流计算	146
		5.2.4.1 系统Ⅱ单相接地故障的短路 电流计算	147
		5.2.4.2 系统Ⅰ单相接地故障的短路 电流计算	149
		5.2.4.3 系统Ⅱ两相接地故障的短路 电流计算	150
		5.2.4.4 系统Ⅰ两相接地故障的短路 电流计算	152
		5.2.4.5 三相短路时绕组Ⅲ的短路电 流计算	154
		5.3 变压器漏磁通分布与短路力的 关系	155
		5.3.1 双绕组变压器漏磁分布的	

特点	156	5.5.3.1 三相三绕组变压器的辐向短路力	170
5.3.2 不平衡安匝产生的辐向漏磁通	157	5.5.3.2 三相三绕组变压器的轴向短路力	170
5.3.3 磁场中心不在同一高度时的辐向漏磁通	158	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	171
5.3.4 三绕组变压器的漏磁通分布	158	5.6 绕组损坏的主要模式	171
5.4 动态短路力与静态短路力	159	5.6.1 绕组变形导致匝绝缘破裂从而引起匝间短路	171
5.4.1 短路力是动态力而不是静态力	159	5.6.2 绕组变形导致主绝缘强度降低进而造成绝缘击穿	172
5.4.2 动态短路力的频率	160	5.6.3 绕组的辐向失稳	172
5.4.3 用静态的方法计算动态短路力的先决条件	160	5.6.4 绕组的轴向失稳	172
5.4.4 短路力的静态计算方法	160	5.7 绕组辐向失稳的分析计算	173
5.4.5 绕组的固有振动频率	161	5.7.1 造成绕组辐向失稳的主要原因	173
5.4.6 短路力的动态计算	161	5.7.2 在计算绕组辐向稳定性时必须考虑的主要问题	174
5.4.7 轴向预压紧力的选取原则	162	5.7.3 绕组辐向失稳平均临界应力的计算方法	174
5.4.8 短路力的超静定计算	162	5.7.3.1 国际大电网会议论文中经常采用的计算公式	174
5.5 绕组受力情况分析	162	5.7.3.2 前苏联经常采用的计算公式	175
5.5.1 短路力作用方向的判断原则	162	5.7.3.3 日本变压器专业委员会推荐的计算方法	176
5.5.2 三相双绕组变压器受力情况分析	163	5.7.3.4 波兰电工协会的研究结论	178
5.5.2.1 轴向漏磁分量产生的辐向短路力	163	5.7.4 提高绕组辐向稳定性的主要技术措施	178
5.5.2.2 磁力线在绕组端部弯曲产生的轴向短路力	166	5.8 绕组轴向失稳的分析与计算	179
5.5.2.3 安匝不平衡产生的轴向短路力	167	5.8.1 绕组轴向失稳的机理	179
5.5.2.4 磁场中心不在同一高度上产生的轴向短路力	169	5.8.2 造成轴向失稳的主要原因	179
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	169	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	179
5.5.2.6 轴向漏磁分量引起的周向旋转短路力	169	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	180
5.5.2.7 辐向漏磁分量引起的相间短路力	169	5.8.2.3 当绕组的某一固有频率与轴	
5.5.3 三相三绕组变压器的受力情况分析	170		

向短路力的频率相接近时会 产生谐振	180	6.3.3 声功率级	194
5.8.3 轴向失稳的计算	181	6.3.4 响度级和等响度曲线	194
5.8.4 提高绕组轴向稳定性的主 要措施	182	6.3.5 变压器噪声以 A 计权方式度 量	194
5.8.4.1 准确地选取与保持足够的轴 向预压紧力	183	6.4 影响变压器噪声的因素	195
5.8.4.2 垫块处理	183	6.4.1 硅钢片的磁致伸缩对噪声 的影响	195
5.8.4.3 绕组恒压干燥处理	183	6.4.2 铁心结构对噪声的影响	195
5.8.4.4 总装配时轴向预压紧力的准 确控制	184	6.4.3 铁心装配工艺对噪声的影 响	196
5.9 提高绕组抗短路能力应采取的 主要技术措施	184	6.4.4 谐振对噪声的影响	197
5.9.1 设计计算方面	184	6.5 降低变压器噪声的措施	197
5.9.2 制造工艺方面	185	6.5.1 降低本体噪声	197
5.9.2.1 绝缘件制造方面	185	6.5.1.1 降低铁心噪声	197
5.9.2.2 绕组绕制方面	185	6.5.1.2 降低油箱及其结构件噪声	198
5.9.2.3 器身装配与整体套装方面	185	6.5.2 降低冷却装置噪声	198
5.10 绕组变形的测量	186	6.5.2.1 降低冷却风扇噪声	198
5.11 变压器短路强度的计算验证	186	6.5.2.2 降低自冷式散热器噪声	199
5.12 短路力计算的有限元方法的主 要公式	187	6.5.2.3 降低油泵噪声	199
5.12.1 静态短路力计算	187	6.5.3 在传播路径上采取隔声措 施	199
5.12.2 动态短路力计算	188	6.5.4 在传播路径上采取消声措 施	199
5.12.3 绕组短路机械强度计算	189	6.6 变压器噪声的设计计算	200
5.12.3.1 轴向弯曲应力	189	6.6.1 变压器本体噪声的计算	200
5.12.3.2 由纵向漏磁通产生的外绕组 所受的抗拉应力	189	6.6.1.1 自冷式变压器本体噪声	200
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	190	6.6.1.2 变压器噪声在空气中的 衰减	200
5.13 结束语	190	6.6.2 冷却装置噪声的计算	201
第 6 章 变压器噪声	192	6.6.3 变压器噪声的计算	201
6.1 变压器噪声的来源	192	6.6.4 铁心固有频率的计算	201
6.1.1 变压器本体噪声	192	6.6.5 高效隔声板的降噪计算	202
6.1.2 冷却装置的噪声	193	6.6.5.1 高效隔声板的基本结构	202
6.2 变压器噪声的传播路径	193	6.6.5.2 高效隔声板隔声量的计算	202
6.3 变压器噪声的度量	193	6.7 变压器噪声的测定	203
6.3.1 声压级	193	6.7.1 测定方法的选择	203
6.3.2 声强级	193	6.7.2 测量仪器的校准	203
		6.7.3 被测变压器试验时的负载状 态	203
		6.7.4 测量位置	204

6.7.5 声压法	205	能的影响	229
6.7.5.1 测量环境	205	7.4.3.1 磁性钢片变形和机械应力	
6.7.5.2 测量环境修正值 K 的确定	205	对空载损耗的影响	229
6.7.5.3 被试变压器的运行状态	206	7.4.3.2 铁心片毛刺和绝缘损伤与	
6.7.5.4 平均声压级的计算	206	空载性能	229
6.7.6 声强法	207	7.4.3.3 铁心冲孔对空载损耗的影	
6.7.6.1 测量环境	207	响	229
6.7.6.2 被试变压器的运行状态	207	7.4.3.4 铁心接缝尺寸对空载损耗的	
6.7.6.3 平均声强级的计算	207	影响	230
6.7.7 声功率级的计算	207	7.4.4 铁心设计对空载损耗的影	
6.7.8 变压器额定负载状态时的		响	230
声功率级	208	7.4.4.1 铁心叠片图对空载损耗的影	
6.8 变压器声级	208	响	230
7.4.4.2 每叠片数与空载性能	232		
7.4.4.3 交错接缝和阶梯接缝的空载		7.4.4.3 交错接缝和阶梯接缝的空载	
损耗	233	损耗	233
7.4.4.4 铁心截面形状对空载损耗的		7.4.4.4 铁心截面形状对空载损耗的	
影响	236	影响	236
7.4.5 晶粒取向磁性钢片铁心的损		7.4.5 晶粒取向磁性钢片铁心的损	
耗系数	238	耗系数	238
7.5 联结组别与铁心空载性能	238	7.5 联结组别与铁心空载性能	238
7.6 励磁涌流	239	7.6 励磁涌流	239
7.7 噪声	241	7.7 噪声	241
7.7.1 变压器产生噪声的原因	241	7.7.1 变压器产生噪声的原因	241
7.7.2 变压器铁心噪声和磁性		7.7.2 变压器铁心噪声和磁性	
钢片品种与磁通密度的		钢片品种与磁通密度的	
关系	242	关系	242
7.7.2.1 变压器噪声和铁心磁通密度		7.7.2.1 变压器噪声和铁心磁通密度	
的关系	242	的关系	242
7.7.2.2 变压器噪声级和铁心夹紧		7.7.2.2 变压器噪声级和铁心夹紧	
力的关系	242	力的关系	242
第8章 绕组	244	第8章 绕组	244
8.1 导体	244	8.1 导体	244
8.1.1 常规导体材料铜和铝	244	8.1.1 常规导体材料铜和铝	244
8.1.2 高温超导材料	246	8.1.2 高温超导材料	246
8.2 绕组用导线	247	8.2 绕组用导线	247
8.2.1 圆导线	247	8.2.1 圆导线	247
8.2.2 扁导线	248	8.2.2 扁导线	248
8.2.3 组合导线	251	8.2.3 组合导线	251
8.2.4 换位导线	251	8.2.4 换位导线	251
7.4.1 铁心的空载损耗	228		
7.4.2 铁心的空载电流	229		
7.4.3 铁心的制造工艺对空载性			

8.3 绕组的分类与结构	252	9.2.2.1 $U_m < 300\text{kV}$ 的绕组	320
8.3.1 变压器绕组结构的一般性介绍	252	9.2.2.2 中性点套管带电部分的对地空气间隙	321
8.3.1.1 绕组的绕向	252	9.2.2.3 $U_m \geq 300\text{kV}$ 的绕组	321
8.3.1.2 绕组的连接图和联结组	253	9.3 变压器内、外部的典型电场和典型绝缘结构	322
8.3.1.3 绕组中的换位	258	9.3.1 变压器中绝缘的分类	322
8.3.1.4 绕组中的绝缘	265	9.3.2 变压器内部的典型电场	322
8.3.2 变压器绕组结构的分类	265	9.3.3 变压器内部的典型绝缘结构	323
8.3.2.1 层式绕组	265	9.3.4 变压器外部电场	324
8.3.2.2 饼式绕组	269	9.4 变压器的主绝缘	324
第9章 变压器器身绝缘及引线绝缘	283	9.4.1 变压器主绝缘结构的选择原则	324
9.1 变压器的主要绝缘材料及其绝缘特性	283	9.4.2 变压器的主绝缘结构	324
9.1.1 液体绝缘材料	283	9.4.3 变压器主绝缘结构的发展前景	326
9.1.1.1 变压器油	283	9.4.4 变压器器身绝缘典型结构	326
9.1.1.2 α 油、 β 油	291	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	326
9.1.1.3 复叠绝缘液体	292	9.4.4.2 高压为 66kV 级的器身绝缘	328
9.1.1.4 聚氯联苯	292	9.4.4.3 高压为 110kV 级的器身绝缘	328
9.1.1.5 硅油	293	9.4.4.4 高压为 220kV 级的器身绝缘	330
9.1.2 气体绝缘材料	295	9.5 变压器的纵绝缘	332
9.1.2.1 空气	295	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	332
9.1.2.2 SF_6 气体	296	9.5.1.1 变压器上的作用电压的种类	332
9.1.3 固体绝缘材料	298	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	333
9.1.3.1 绝缘纸、绝缘纸板和纸制品	298	9.5.2 变压器绕组结构的选择	349
9.1.3.2 木材和木制品	312	9.5.3 变压器绕组纵绝缘的设计	354
9.1.3.3 胶纸板、胶布板、胶纸管、胶布管	313	9.5.3.1 不同电压等级的变压器绕	
9.1.3.4 纤维制品	316		
9.1.3.5 化学制品	317		
9.1.4 油、纸绝缘结构	318		
9.1.4.1 覆盖	318		
9.1.4.2 绝缘层	318		
9.1.4.3 绝缘隔板	318		
9.2 变压器的绝缘水平	319		
9.2.1 变压器绕组及引出线的绝缘水平	319		
9.2.2 变压器套管对地和套管之间的空气间隙	320		

组的结构型式的选择	354	程	383
9.5.3.2 匝绝缘和匝绝缘与油道绝		9.10.1.2 快速瞬态过电压的特点	383
缘配合的冲击绝缘强度的		9.10.2 快速瞬态过电压对变压器	
校核	355	绝缘的影响	383
9.6 变压器的局部放电	356	9.10.2.1 快速瞬态过电压的最大幅	
9.6.1 引起变压器局部放电的原		值	383
因	356	9.10.2.2 快速瞬态过电压作用在变压	
9.6.2 无局部放电变压器的设计		器上时的电压分布情况	383
与工艺制造	359	9.10.3 快速瞬态过电压作用下	
9.7 变压器工频感应和外施耐压		变压器绕组上应采取的	
试验时的绝缘特性	360	措施	384
9.7.1 工频电压作用下变压器		附录 9.A 按 GB/T 7595—2000《运行	
绝缘系统的绝缘特性	360	中变压器油质量标准》, 油	
9.7.2 工频电压作用下变压器		中溶解气体组分含量色谱	
绝缘结构中采取的对策	361	分析检验周期和要求	384
9.7.2.1 绝缘材料的选择	361	附录 9.B 不同电极形状及操作方	
9.7.2.2 充分利用提高变压器油的		法对变压器油击穿电压测	
放电特性的一切手段	361	定值的影响	385
9.7.2.3 提高沿面放电的措施	361	附录 9.C 计算式(9-39)和式(9-40)	
9.8 变压器中其他典型结构的电		中系数 ϕ 求取时所用的附	
场	362	图	386
9.8.1 变压器的端绝缘	362	第 10 章 变压器油箱	388
9.8.1.1 变压器端部电场的描述	362	10.1 概述	388
9.8.1.2 变压器端部电场的基本结		10.2 对变压器油箱的基本要求	388
构	362	10.2.1 6kV、10kV 电压等级	388
9.8.2 变压器的引线绝缘	364	10.2.2 35kV 电压等级	390
9.8.2.1 变压器引线的选择	364	10.2.3 66kV 电压等级	391
9.8.2.2 变压器引线绝缘	370	10.2.4 110kV 电压等级	393
9.8.2.3 变压器引线绝缘距离	372	10.2.5 220kV 电压等级	394
9.9 变压器绝缘表面的沿面放电	378	10.2.6 330kV 电压等级	396
9.9.1 引起变压器绝缘表面沿面		10.2.7 500kV 电压等级	397
放电的结构原因	378	10.3 油箱的分类与结构	398
9.9.2 引起变压器绝缘表面沿面		10.3.1 油箱的分类	398
放电的因素	380	10.3.1.1 按冷却方式进行分类	398
9.9.3 防止变压器绝缘表面发生		10.3.1.2 按油箱外形进行分类	400
沿面放电的对策和措施	380	10.3.2 常用油箱的结构	401
9.10 快速瞬态过电压	383	10.3.2.1 中小型变压器油箱	401
9.10.1 快速瞬态过电压的产生和		10.3.2.2 大型变压器油箱	404
特点	383	10.4 油箱结构设计要点	411
9.10.1.1 快速瞬态过电压的产生过			

10.4.1 箱沿结构	411	10.5.1.1 箱壁力学性能计算	432
10.4.2 吊攀结构	412	10.5.1.2 各种加强铁的强度估算	435
10.4.3 法兰连接结构	413	10.5.1.3 箱沿密封部件的机械强度计 算	437
10.4.4 变压器的密封	415	10.5.1.4 箱底的机械强度计算	438
10.4.4.1 密封的基本知识	415	10.5.1.5 盖板的应力与挠度	438
10.4.4.2 密封结构的设计	416	10.5.1.6 箱壁及其加强铁力学性能的 计算举例	439
10.4.4.3 变压器密封的特点	418	10.5.2 油箱耐压力学特性的计算 机分析与结构优化设计	440
10.4.5 油箱的器身定位结构	420	10.5.2.1 油箱耐压力学特性的计算机 分析	440
10.4.5.1 器身的下部定位结构	420	10.5.2.2 油箱结构的优化设计	440
10.4.5.2 器身的上部定位结构	420	10.5.3 油箱耐压试验的失效形式 与材料的许用应力	442
10.4.6 强油导向冷却时的导油结 构	421	10.5.3.1 油箱耐压试验的失效形 式	442
10.4.6.1 利用下夹件进行导油	421	10.5.3.2 油箱材料的许用应力	442
10.4.6.2 利用导油管进行导油	421	10.5.4 油箱加强铁的结构	443
10.4.6.3 箱底导油结构	422	第 11 章 变压器结构件设计与力 学性能分析	444
10.4.7 油箱磁屏蔽	422	11.1 变压器内部结构件及其力学 性能分析	444
10.4.7.1 油箱磁屏蔽的结构	422	11.1.1 变压器内部器身结构简 介	444
10.4.7.2 油箱磁屏蔽的设计	424	11.1.1.1 铁心磁路结构	444
10.4.8 油箱电磁屏蔽	424	11.1.1.2 铁心夹紧结构	444
10.4.8.1 油箱电磁屏蔽与磁屏蔽的比 较	424	11.1.2 绑扎铁心结构的结构件力 学性能分析	447
10.4.8.2 油箱电磁屏蔽的结构	425	11.1.2.1 力学分析的基本假设	449
10.4.9 油箱的隔声降噪结构	425	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	450
10.4.9.1 变压器本体噪声的产生机 理	425	11.1.2.3 铁心拉板及其相关件的机械 强度计算	451
10.4.9.2 油箱降噪的技术措施	425	11.1.2.4 铁轭夹件的机械强度计 算	455
10.4.9.3 隔声技术措施	426	11.1.2.5 铁轭拉带的应力计算	462
10.4.10 套管升高座及管接头的设 计	426	11.1.2.6 上铁轭撑板的应力与变形计 算	464
10.4.10.1 利用套管升高座旋转保证外 绝缘距离	426		
10.4.10.2 斜升高座的设计	427		
10.4.10.3 斜管接头的设计	429		
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	429		
10.4.11 油箱设计的注意问题	431		
10.5 变压器油箱耐压力学性能分析 与计算	432		
10.5.1 油箱力学性能简化计算的 传统解析方法	432		

11.1.2.7 器身垫脚的机械强度计算	465	12.1.4 无励磁分接开关的结构形式	492
11.1.2.8 下定位钉及上部定位件焊缝的应力计算	467	12.1.4.1 鼓形结构无励磁分接开关	492
11.1.2.9 器身上部压板及下部托板的应力计算	468	12.1.4.2 楔形结构无励磁分接开关	493
11.1.3 螺杆夹紧铁轭结构的机械强度计算	470	12.1.4.3 笼形结构无励磁分接开关	494
11.1.3.1 铁心叠片的夹紧力	470	12.1.4.4 条形结构无励磁分接开关	494
11.1.3.2 铁心柱绑扎带的绑扎厚度计算	471	12.1.4.5 盘形结构无励磁分接开关	495
11.1.3.3 三相三柱铁心结构机械强度计算	472	12.1.5 无励磁分接开关的分接布置	495
11.1.3.4 三相五柱铁心结构机械强度计算	475	12.1.5.1 中性点调压	495
11.1.3.5 器身压钉的机械强度计算	478	12.1.5.2 绕组中部调压	496
11.1.3.6 下夹件上肢板的机械强度计算	480	12.2 有载分接开关	496
11.2 变压器抗地震性能分析	480	12.2.1 有载分接开关的有关定义	498
11.2.1 与地震有关的常用术语解释	480	12.2.1.1 分接选择器	498
11.2.2 地震时变压器的破坏形式	483	12.2.1.2 切换开关	498
11.2.2.1 动态损坏	483	12.2.1.3 选择开关	498
11.2.2.2 静态损坏	483	12.2.1.4 转换选择器	498
11.2.2.3 保护装置误动作	483	12.2.1.5 过渡阻抗	498
11.2.3 变压器的抗震计算	483	12.2.1.6 驱动机构	498
11.2.3.1 变压器本体的抗震能力计算	484	12.2.1.7 触头组	498
11.2.3.2 变压器套管的抗震能力计算	485	12.2.1.8 切换开关和选择开关的触头	498
第 12 章 变压器组件	490	12.2.1.9 循环电流	499
12.1 无励磁分接开关	490	12.2.1.10 开断电流	499
12.1.1 无励磁分接开关的标准	490	12.2.1.11 恢复电压	499
12.1.2 无励磁分接开关的性能要求	490	12.2.1.12 分接变换(操作)	499
12.1.2.1 额定值	490	12.2.1.13 操作循环	499
12.1.2.2 性能要求	490	12.2.1.14 绝缘水平	499
12.1.3 无励磁分接开关的型号	491	12.2.1.15 额定通过电流 I_0	499
		12.2.1.16 最大额定通过电流 I_m	499
		12.2.1.17 额定级电压 U_1	499
		12.2.1.18 最大额定级电压 U_m	499
		12.2.1.19 额定频率	499
		12.2.1.20 分接开关的分接位置数	499
		12.2.1.21 型式试验	499
		12.2.1.22 出厂(例行)试验	500