

保定天威保变电气股份有限公司 编著

变压器试验技术



机械工业出版社
China Machine Press

变压器试验技术

保定天威保变电气股份有限公司 编著



机械工业出版社

本书根据变压器试验的有关国家标准及 IEC 标准结合天威集团保定天威保变电气股份有限公司（原保定变压器厂）多年来在变压器试验方面的实践经验，比较系统地介绍了变压器试验的程序、方法、线路、设备以及近年来变压器最新试验技术，提出了试验过程中应注意的问题和故障诊断分析方法，同时还较为详细地介绍了变压器油的试验技术，并针对变压器安装完后的现场交接试验进行了介绍。另外，还补充介绍了变压器试验的基础知识和冷却装置、分接开关等试验。

本书内容充实、全面、先进、实用，可供变压器设计、制造、试验、使用及维修部门从事变压器试验工作的人员阅读。

图书在版编目（CIP）数据

变压器试验技术/保定天威保变电气股份有限公司编著
—北京：机械工业出版社，2000.3
ISBN 7-111-07824-1

I. 变… II. 保… III. 变压器-试验-技术
IV. TM406

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 01591 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：边 萌 版式设计：张世琴 责任校对：罗凤书
封面设计：李雨桥 责任印制：郭景龙
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2001 年 5 月第 1 版·第 2 次印刷
850mm×1168mm¹/₃₂·24.25 印张·648 千字
4 001—7 000 册
定价：38.00 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、68326677-2527

前 言

为了适应我国变压器产品电压等级和变压器单台容量的不断提高的形势，促进变压器试验技术的发展，满足广大从事变压器设计、制造、使用、试验的工人以及工程技术人员需要，总结国内外变压器试验技术和试验装备的发展经验，天威集团保定天威保变电气股份有限公司结合多年来变压器试验的实践经验，组织编写了《变压器试验技术》这本书。

在本书的编写过程中，我们力求理论联系实际，既考虑到实际使用，又进行相应的理论分析。近年来变压器试验技术发展很快，试验设备和测试仪器不断更新。随着我国变压器产品进入国际市场，国家标准 GB 1094《电力变压器》、GB 311《高压输变电设备的绝缘配合 高电压试验技术》等正在根据 IEC 标准的修订在逐步进行修订。因此，我们结合国家标准的修订，还介绍了当前国内外变压器试验的最新技术。为了便于读者对各章内容的理解和掌握，在每章结尾部分均通过实例加以说明。

全书共分 23 章。第 1、2、3、4、16、22 章由胡启凡教授级高级工程师编写；第 5、6、7、19、21 章由曹利安高级工程师编写；第 8、9 章由谢毓城教授级高级工程师编写；第 10、11、17、18、20 章由张喜乐高级工程师编写；第 12、13、14 章由王雪刚高级工程师编写；第 15 章由王文昌高级工程师编写；第 23 章由董宝骅教授级高级工程师编写。全书由胡启凡教授级高级工程师主编。

天威集团保定天威保变电气股份有限公司领导对本书的编写给予了大力帮助和支持，天威集团保定天威保变电气股份有限公司检验处、检测中心等单位也给予很大帮助。本书的很多实例均由天威集团保定天威保变电气股份有限公司检验处、检测中心提

IV

供，我们在此谨致以深切的谢意。

限于我们的水平，书中不妥和错误之处在所难免，衷心欢迎使用本书的广大读者批评指正。

编者

目 录

前言

第 1 章 变压器试验基础	1
1.1 概述	1
1.2 变压器试验的标准	2
1.3 变压器的试验项目	4
1.3.1 例行试验	4
1.3.2 型式试验	4
1.3.3 特殊试验	5
1.4 试验误差	6
1.4.1 误差的定义	6
1.4.2 按误差规律分类	8
1.4.3 误差的表达	9
1.4.4 误差的处理	11
1.4.5 精密度、正确度和准确度	11
1.5 不确定度和极限误差	12
1.6 测量结果的有效数字	13
1.6.1 数字的修约规则	14
1.6.2 有效数字	14
第 2 章 电压比测量及联结组标号检定	16
2.1 概述	16
2.1.1 电压比测量的目的	16
2.1.2 电压比的允许偏差	16
2.2 电压比测量	18
2.2.1 测量方法	18
2.2.2 测量线路和测量方法	21
2.2.3 试验例	27

2.3 绕组联结组标号检定	29
2.3.1 绕组联结组	29
2.3.2 绕组联结组标号的测量	33
第3章 绕组直流电阻测量	38
3.1 测量的目的和要求	38
3.2 测量方法	39
3.2.1 电桥法	39
3.2.2 伏-安表法	46
3.2.3 变压器直流电阻测量装置	48
3.3 测量结果计算	50
3.3.1 环境温度下测量结果换算到其他温度	50
3.3.2 相电阻和线电阻的计算	51
3.3.3 线电阻和相电阻的不平衡率	51
3.4 变压器直流电阻测量时的时间常数	55
3.4.1 单相变压器	57
3.4.2 三相三铁心柱变压器, 绕组三角形 (D) 联结	58
3.4.3 三相五铁心柱变压器	61
3.5 测量直流电阻时选用的电流值	61
3.6 缩短测量时间的方法	63
3.6.1 恒流源法	64
3.6.2 减小时间常数法	65
3.6.3 绕组串联法	66
3.6.4 感应电动势法	66
3.6.5 短路另一侧绕组	68
3.7 测量直流电阻的注意事项	69
3.8 电阻测量时的温度测量	69
3.9 变压器电阻测量实例	70
3.9.1 变压器数据	70
3.9.2 试验结果	70
参考文献	72
第4章 变压器损耗测量及误差	73
4.1 概述	73

4.1.1 空载损耗	73
4.1.2 负载损耗	73
4.1.3 辅机损耗	74
4.2 变压器损耗测量的线路	74
4.2.1 单相变压器损耗测量线路	74
4.2.2 三相变压器损耗测量线路, 三瓦特表法	76
4.2.3 三相变压器损耗测量线路, 二瓦特表法	78
4.2.4 新型变压器损耗测量线路	80
4.3 损耗测量及误差	81
4.3.1 损耗的表达式及误差	81
4.3.2 变压器负载损耗测量时的 $\cos\varphi$	82
4.4 影响损耗测量的各种因素	85
4.4.1 系统误差	85
4.4.2 未定系统误差	88
4.4.3 随机误差	90
4.5 三相试验的二瓦特表法和三瓦特表法	91
4.5.1 二瓦特表法由未定系统误差引起的误差	91
4.5.2 三瓦特表法由未定系统误差引起的误差	95
4.5.3 随机误差的影响	97
4.5.4 随机误差和未定系统误差的合成不确定度	100
4.6 新型损耗测量系统	100
4.6.1 系统构成	100
4.6.2 标准测量系统的功率测量的不确定度	105
4.6.3 新型损耗测量系统和标准损耗测量系统在现场损耗 测量的对比试验结果	106
4.6.4 变压器测试系统	106
参考文献	108
第5章 空载试验	109
5.1 概述	109
5.2 空载试验的程序	109
5.3 变压器的空载损耗和空载电流	110
5.3.1 空载损耗	110

5.3.2 空载电流	113
5.4 铁心常用的电工钢带品种	113
5.5 空载试验的方法和线路	115
5.5.1 试验线路	115
5.5.2 空载试验方法	115
5.6 空载试验所用的设备和仪器仪表	120
5.6.1 试验电源	120
5.6.2 中间变压器	123
5.6.3 测量用互感器和仪表	123
5.7 铁心绕临时绕组的试验	124
5.8 非额定条件下的空载试验	126
5.8.1 波形非实际正弦波	126
5.8.2 电压不是额定电压时进行空载试验	126
5.8.3 单相试验	127
5.9 空载试验的不确定度	134
5.9.1 功率因数 $\cos\varphi$ 的影响	134
5.9.2 电压表的影响	134
5.10 空载试验实例	135
5.10.1 变压器型式	135
5.10.2 铁心绕临时绕组的空载试验	135
5.10.3 半成品空载试验	136
5.10.4 成品空载试验	137
5.10.5 空载试验结果	138
5.11 空载电流谐波测量	139
5.11.1 三相三柱铁心变压器的空载电流谐波	139
5.11.2 三相五柱铁心变压器的空载电流谐波	140
参考文献	141
第6章 负载损耗和短路阻抗测量	142
6.1 负载试验概述	142
6.1.1 负载损耗	143
6.1.2 短路阻抗	144
6.2 负载损耗和短路阻抗的测量	145

6.2.1	试验线路	145
6.2.2	负载试验的方法	145
6.2.3	负载损耗的测量结果	145
6.2.4	负载损耗校正到参考温度	146
6.2.5	短路阻抗试验结果的计算	151
6.3	非额定条件下负载损耗和短路阻抗的测量	151
6.3.1	非额定电流条件下负载损耗和短路阻抗的测量	151
6.3.2	非额定频率条件下负载损耗和短路阻抗的测量	154
6.3.3	三相变压器的单相负载损耗和短路阻抗的测量	155
6.4	负载损耗和短路阻抗测量应注意的问题	156
6.4.1	正确选择试验电源容量	156
6.4.2	负载损耗和短路阻抗测量试验时的功率因数 $\cos\varphi$	157
6.4.3	负载损耗和短路阻抗测量持续时间	157
6.4.4	负载损耗和短路阻抗测量使用的短路连接线	158
6.5	试验实例	158
6.5.1	三绕组变压器	158
6.5.2	自耦变压器	161
6.5.3	分裂变压器负载损耗和短路阻抗测量	165
第7章	绝缘特性测量	170
7.1	绝缘特性测量的目的和意义	170
7.2	绝缘电阻及介质的吸收现象	170
7.2.1	物理现象	170
7.2.2	绝缘电阻	171
7.2.3	吸收比、极化指数	172
7.2.4	绝缘电阻、吸收比、极化指数的试验方法及 试验用仪器仪表	173
7.2.5	绝缘电阻测量时的注意事项	175
7.2.6	绝缘电阻试验结果的判定	176
7.3	介质损耗因数 ($\tan\delta$) 试验	180
7.3.1	绝缘介质损耗因数特性	180
7.3.2	$\tan\delta$ ——电压特性	183
7.3.3	$\tan\delta$ ——温度特性	185

7.3.4 $\tan\delta$ 测定使用的仪器及试验方法	187
7.3.5 测量注意事项	190
第8章 变压器的绝缘结构	192
8.1 概述	192
8.2 变压器上的作用电压	192
8.2.1 变压器上的作用电压的种类	192
8.2.2 外部过电压(冲击电压)的波形	193
8.2.3 内部过电压的波形	195
8.2.4 变压器绕组的绝缘水平	196
8.3 变压器中电场的基本类型及绝缘分类	197
8.3.1 概述	197
8.3.2 变压器内部绝缘结构	199
8.3.3 变压器外部绝缘	199
8.4 电力变压器使用的主要材料及其在各种 电场下的特性	200
8.4.1 变压器油	200
8.4.2 绝缘纸和绝缘纸板	204
8.5 变压器中的基本绝缘结构	210
8.5.1 变压器绕组间的主绝缘结构	210
8.5.2 变压器绕组的纵绝缘	213
8.5.3 用计算机计算绕组的波过程	219
8.5.4 改善冲击电压分布的几种方法	224
8.5.5 变压器的端绝缘结构	231
8.5.6 变压器的引线绝缘	233
8.6 变压器局部放电问题	234
参考文献	235
第9章 外施耐压试验	236
9.1 概述	236
9.2 试验设备	237
9.2.1 试验变压器	237
9.2.2 试验电源	243
9.2.3 工频耐压试验时的保护装置	246

9.2.4 工频耐压试验中的电压测量装置	248
9.3 变压器工频耐压试验	254
9.3.1 试验接线	254
9.3.2 试验注意事项	257
9.3.3 外施耐压试验结果的判断	258
9.4 试验实例	259
9.4.1 试验变压器及电源选择	260
9.4.2 测量及仪表	260
9.4.3 无功补偿	262
9.4.4 试验线路	265
9.4.5 试验操作	265
第 10 章 感应耐压试验	270
10.1 概述	270
10.2 试验要求	270
10.3 感应耐压试验方法	271
10.3.1 全绝缘变压器	271
10.3.2 分级绝缘变压器	272
10.4 感应耐压试验设备	288
10.4.1 试验电源	288
10.4.2 中间变压器	289
10.4.3 支撑变压器	290
10.5 感应耐压试验应注意的几个问题	290
10.5.1 试验准备及监测	290
10.5.2 同步发电机的自励磁现象	291
10.5.3 试验电压的测量	291
10.5.4 试验结果的判定	292
10.6 实例与分析	292
参考文献	297
第 11 章 局部放电测量	298
11.1 概述	298
11.2 局部放电有关基本概念和基本理论	298
11.2.1 局部放电的表征参数及其相互关系	298

11.2.2	局部放电测量方法	301
11.3	变压器局部放电的特点	306
11.3.1	变压器中产生局部放电的几种典型结构及因素	307
11.3.2	放电脉冲在变压器绕组中的传播特性	309
11.4	变压器局部放电的测量	312
11.4.1	试验方法及标准	312
11.4.2	测试回路	315
11.4.3	放电量的校准方法	316
11.4.4	校准脉冲参数对定量校准的影响	318
11.5	国内外几种常用的局部放电测试仪	319
11.6	变压器局部放电测量中的抗干扰措施	321
11.6.1	试验室的屏蔽	321
11.6.2	变压器高压线端的屏蔽	322
11.7	变压器局部放电定位方法	323
11.7.1	电气定位法	323
11.7.2	超声波定位法	325
11.8	局部放电测量中应注意的几个问题	332
11.8.1	高压套管内部放电	332
11.8.2	局部放电测试仪频带宽度的选择	334
11.8.3	注意事项	334
11.9	局部放电测量实例	335
	参考文献	337
第 12 章	雷电冲击电压试验及低电压冲击测量	338
12.1	概述	338
12.2	冲击电压发生器	338
12.2.1	标准冲击电压波形	339
12.2.2	冲击电压发生器的工作原理	342
12.2.3	截波电压的产生	348
12.2.4	冲击电压发生器实例	349
12.3	冲击电压测量技术	353
12.3.1	利用球间隙测量冲击电压	354
12.3.2	冲击分压器测量系统	354

12.3.3 使用电场探头测量冲击电压	366
12.3.4 冲击电压数字测量技术	369
12.4 变压器冲击试验	377
12.4.1 冲击试验方法	378
12.4.2 冲击试验故障判断原理及方法	383
12.4.3 冲击试验的典型示伤波形	397
12.4.4 变压器冲击试验实例	408
12.5 低电压冲击测量	409
12.5.1 低电压冲击波发生器	410
12.5.2 测量仪器	411
12.5.3 测量实例	413
参考文献	420
第 13 章 操作冲击电压试验	422
13.1 概述	422
13.2 操作冲击电压波形	424
13.3 操作冲击电压波形的产生	425
13.3.1 利用冲击电压发生器产生操作冲击电压	425
13.3.2 利用变压器低压励磁产生操作冲击电压	427
13.4 操作冲击电压波形参数的估算	428
13.4.1 变压器等效参数的确定	428
13.4.2 利用冲击电压发生器产生操作冲击电压的参数估算	432
13.4.3 利用变压器产生操作冲击电压的参数估算	435
13.5 变压器操作冲击试验	438
13.5.1 操作冲击试验线路及方法	439
13.5.2 操作冲击电压试验的故障诊断	441
13.5.3 操作冲击试验实例	444
参考文献	447
第 14 章 无线电干扰测量	448
14.1 概述	448
14.2 无线电干扰	448
14.2.1 无线电干扰的主要来源	448
14.2.2 无线电干扰的性质	449

14.2.3	无线电干扰的传播途径	449
14.3	测量仪器原理及要求	449
14.3.1	干扰测量仪的工作原理	450
14.3.2	对测量仪的技术要求	451
14.4	变压器无线电干扰测量	452
14.4.1	无线电干扰测量原理及线路	452
14.4.2	试品无线电干扰水平的确定	454
14.4.3	利用“直接校对定度法”确定试品的干扰水平	455
	参考文献	456
第 15 章	变压器油试验	458
15.1	变压器油基础知识	458
15.1.1	变压器油的化学组成	458
15.1.2	变压器油和变压器的密切关系	458
15.1.3	变压器油试验的意义及质量指标、试验方法	459
15.2	取样	461
15.2.1	取样方法的重要性	461
15.2.2	取样基本要求	461
15.2.3	取样操作	463
15.3	密度	463
15.3.1	概述	463
15.3.2	测试仪器	464
15.3.3	测试操作	465
15.3.4	极低、极高温度下油密度的测试	465
15.4	运动粘度	466
15.4.1	概述	466
15.4.2	测试仪器与所需材料	467
15.4.3	测试操作	469
15.5	凝点和倾点	470
15.5.1	概述	470
15.5.2	凝点测试仪器与冷却剂	471
15.5.3	凝点测试操作	472
15.5.4	倾点测试和凝点测试的异同	473

15.6	闪点	474
15.6.1	概述	474
15.6.2	测试仪器	475
15.6.3	测试操作	475
15.7	水溶性酸或碱	476
15.7.1	概述	476
15.7.2	水溶性酸碱定性测定法	476
15.7.3	pH 值比色测定法	477
15.8	酸值	478
15.8.1	概述	478
15.8.2	标准氢氧化钾乙醇溶液的配制	479
15.8.3	指示剂法	480
15.8.4	电位滴定法	481
15.8.5	快速测定法简介	482
15.9	腐蚀性硫	482
15.9.1	概述	482
15.9.2	测试方法	483
15.10	界面张力	484
15.10.1	概述	484
15.10.2	测试仪器	485
15.10.3	测试操作	486
15.11	抗氧化安定性	487
15.11.1	概述	487
15.11.2	测试仪器和材料	487
15.11.3	氧化老化过程	489
15.11.4	沉淀物测定操作	489
15.11.5	酸值测定操作	491
15.12	含水量	492
15.12.1	概述	492
15.12.2	测试原理和仪器	492
15.12.3	测试操作	495
15.13	含气量	496

15.13.1	概述	496
15.13.2	真空盐水法	497
15.13.3	二氧化碳洗脱法	499
15.14	击穿电压	502
15.14.1	概述	502
15.14.2	测试仪器和条件	503
15.14.3	测试操作	506
15.15	介质损耗因数 ($\tan\delta$)	506
15.15.1	概述	506
15.15.2	测试仪器	507
15.15.3	测试操作	510
15.16	油中溶解气体组分分析	511
15.16.1	概述	511
15.16.2	脱气方法	512
15.16.3	色谱仪	514
15.16.4	计算方法	516
15.16.5	测试操作	518
15.16.6	变压器故障诊断方法	520
15.17	非国标项目	521
15.17.1	体积电阻率	521
15.17.2	析气性	522
15.17.3	杂质颗粒含量	525
15.17.4	油流带电度	526
	参考文献	527
第 16 章	温升试验	529
16.1	概述	529
16.1.1	油浸式电力变压器的温升限值	529
16.1.2	干式电力变压器的温升限值	531
16.2	变压器的发热和冷却	531
16.2.1	变压器的发热过程	531
16.2.2	变压器的发热和冷却	533
16.3	温升试验	536