

电力变压器检修 与试验手册

钟洪璧 高占邦 王正官 王世阁 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TM41-62
乙739

电力变压器检修 与试验手册

钟洪璧 高占邦 王正官 王世阁 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本手册依据较为详实的数据和资料,简要地介绍了变压器主要结构型式和特点(器身和主要附件)、标准和非标准项目的检修内容、技术以及贯穿于各个阶段的试验、检查技术等。

在设备的结构型式、特点中,对绕组、引线(含绝缘距离)以及高压套管、分接开关、冷却装置等都作了较多的介绍,为正确实施检修和试验工作提供了结构基础知识。

在维护和检修中,以相关规程、标准和现场的实践为主线,介绍了检修项目、内容和方法,绝缘的干燥和处理技术,绝缘油的要求和处理技术,方便了各阶段的操作。

在试验和检查工作的开展中,对各个阶段的试验项目、方法和程序等都作了较为详细的叙述,对试验结果进行正确分析、判断,并为鉴定设备的检修质量和安全投入运行提供结论性意见。

本手册可作为从事变压器的运行维护、检修和试验工作者的重要工具书之一,也可作为有关院校的师生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力变压器检修与试验手册/钟洪璧等编. -北京:
中国电力出版社, 1999.12

ISBN 7-5083-0149-8

I. 电… II. 钟… III. ①电力变压器-检修-技术手册②电力变压器-试验-技术手册 IV. TM41-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 63741 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000 年 1 月第一版 2000 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 25.5 印张 629 千字

印数 0001—5000 册 定价 52.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

随着电力工业的发展，大量的国产电力变压器陆续地投入到电力系统中运行，对电力的安全、经济输送起到了重要作用。

这些新、旧型号的变压器在运行中经常承受着长时期运行电压和短时间过电压以及正常负载和短时间过负载的作用，此外，还有恶劣气候、温度等的不利影响，以及制造、使用和维修技术上的某些不完善之处等，使它们不可避免的在运行中出现不同类型的缺陷，并影响到运行的可靠性。

据此，正确而及时地做好维护和检修，经常保持它们的健康水平是极为重要的环节。这就需要专门的规程和一些维护、检修技术方面的书籍，来保证和指导上述工作的顺利实施。

但目前尚缺少专门而系统的论述电力变压器检修和试验检查方面的书籍，供从事变压器检修和维护人员参考。因此，本手册的编写工作就这样应运而生了。

编者深知，欲做好变压器的检修和试验工作，那就需要深入地了解当今变压器的结构型式、特点及运行情况，正确地实施维护和检修工作，及时地进行贯穿于运行和检修工作中的试验检查。因此，本着这些构思，将手册编辑成三个部分，即第一篇：变压器的结构型式和特点；第二篇：变压器的检修；第三篇：变压器的试验。为有助于检修和试验工作的进行，在本手册的附录中还编辑了相关附件及各种常用的材料规格数据等，供查找选用。

本手册所编辑的主要内容是：

在第一篇中，对线圈、铁心、引线（含绝缘距离）以及套管、分接开关、冷却系统等主要组件都作了较为详细的介绍，为便于正确实施检修和试验工作提供了结构基础知识。

在第二篇中，以有关规程的规定和检修实践为主线，较为详细地介绍了检修内容和方法、绝缘的干燥技术、绝缘油的技术要求和处理方便了检修操作。

在第三篇中，介绍了试验项目、方法和程序，对试验结果进行正确地分析与判断，为检验变压器的检修质量和保证变压器的安全运行提供重要的结论性意见。

由于本手册是由制造厂和电网的变压器工作者共同编写的，在宗旨上本着篇幅紧凑、实用性强和查找数据方便的原则，力求汇集当今变压器制造和电网中运行、检修的经验及资料，为检修和试验工作的正确开展提供方便。

在手册内容编排上，先结构后检修再试验、检查，顺理成章；从实用出发，在各章中列出许多图和表，有的图中有表，有的表中有图，结构与数据、分析和处理同时出现，故使内容比较醒目，提高了实用性和可读性。

本手册可作为从事变压器检修、运行维护和试验工作者工作中的参考书。

本手册中的第一章至第四章由高占邦（注：高占邦逝世后，他所编写的部分由钟洪璧进行了整理和修改）编写；第五章至第十章由钟洪璧、王世阁、王正官编写；第十一章至第十四章由王正官、钟洪璧编写；附录部分由钟洪璧、高占邦编写。最后由钟洪璧汇总编辑成册，集体审阅并订正了书稿。

在本手册编写工作基本结束之际，高占邦同志不幸因公殉职，编者们对他表示深切哀悼，他在编写时的努力将永志于手册中。

编者们的深知，这本手册在这样短的时间里仓促问世，困难的确很大。如果它能对从事变压器的检修和试验工作者有所裨益的话，编者们的将感到极大欣慰。

本手册编辑完成之后，蒙雷国富高级工程师仔细地进行了审阅，并提出了许多宝贵意见，在此致以深深的谢意。

《电力变压器检修与试验手册》的编写，尚属首次尝试，因此在内容的编排上、深度上都会有不周之处，诚望读者批评指正。

编 者

1999 年 9 月

本手册中引用的部分标准代号及名称

序号	标 准 号	标 准 名 称
1	GB 1094.1—85 96	电力变压器第 1 部分总则
2	GB 1094.2—96	电力变压器第 2 部分温升
3	GB 1094.3—85	电力变压器第 3 部分绝缘水平和绝缘试验
4	GB/T 6451—95	三相油浸式电力变压器技术参数和要求
5	GB/T 16274—96	油浸式电力变压器技术参数和要求 500kV 级
6	GB 311.1—97	高压输变电设备的绝缘配合
7	GB/T 16927.1—97	高电压试验技术第 1 部分一般试验要求
8	GB/T 16927.2—97	高电压试验技术第 2 部分测量系统
9	GB 4109—97	高压套管技术条件
10	GB 10230—88	有载分接开关
11	GB 2536—90	变压器油
12	GB 7595—81	运行中变压器油质量标准
13	GB 7354—87	局部放电测量
14	GB 7449—87	电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则
15	GB 7328—87	变压器和电抗器的声级测量
16	GB 7252—87	变压器油中溶解气体分析和判断导则
17	GB/T 501—91	电力变压器试验导则
18	GB 50150—91	电气装置安装工程电气设备交接试验标准
19	GBJ 148—90	电气装置安装工程电力变压器、油浸电抗器、互感器施工及验收规范
20	DL/T 596—96	电力设备预防性试验规程
21	DL/T 572—95	电力变压器运行规程
22	GB 259	石油产品水溶性酸及碱测定法
23	GB 261	石油产品闪点测定法（闭口杯法）
24	GB 264	石油产品酸值测定法
25	GB 265	石油产品运动粘度测定法和动力粘度计算法
26	GB 507	绝缘油介电强度测定法
27	GB 510	石油产品凝点测定法
28	GB 511	石油产品和添加剂机械杂质测定法（重量法）
29	GB 1884	石油和液体石油产品密度测定法（密度计法）
30	GB 1885	石油计量换算表
31	GB3535	石油倾点测定法
32	GB 4756	石油和液体石油产品取样法（手工法）
33	GB 5654	液体绝缘材料工频相对介电常数、介质损耗因数和体积电阻率的测量
34	GB 6541	石油产品对水界面张力测定法（圆环法）
35	ZBE 38003	变压器油氧化安定性测定法
36	ZBE 38004	绝缘油水含量测定法（卡尔·费休法）
37	GB 7598	运行中变压器油、汽轮机油水溶性酸测定法（比色法）
38	GB 7599	运行中变压器油、汽轮机油酸值测定法（BTB 法）
39	GB 7600	运行中变压器油水分含量测定法（库仑法）
40	GB 7601	运行中变压器油水分测定法（气相色谱法）
41	YS—6—1	界面张力测定法
42	YS—27—1	油泥析出测定法
43	YS—30—1	介质损耗因数和体积电阻率测定法
44	YS—C—3—1	气体含量测定法（真空脱气法）
45	YS—C—3—2	气体含量测定法（二氧化碳洗脱法）
46	SY 2689	电气绝缘油腐蚀性硫试验法



前言

本手册中引用的部分标准代号及名称

第一篇 变压器器身和主要附件的结构型式和特点

第一章 线圈的结构型式和特点	1
第一节 线圈的型式和要求	1
第二节 饼式线圈的一般规定	2
第三节 螺旋式线圈的型式和特点	6
第四节 连续式线圈的型式和特点	10
第五节 纠结式线圈的型式和特点	11
第六节 内屏蔽式线圈的型式和特点	14
第七节 线圈在绕制中和绕制后的注意事项	16
第八节 静电板的绕制和应用	17
第二章 铁心的结构型式和特点	19
第一节 铁心的截面积和直径	19
第二节 铁心的叠积型式	22
第三节 铁心的夹紧装置	23
第四节 铁心的绝缘和接地	27
第三章 引线结构的特点和绝缘距离	30
第一节 引线截面的选择	30
第二节 引线至各处的绝缘距离	35
第四章 主要附件的结构型式和特点	48
第一节 高压套管的结构型式和特点	48
第二节 分接开关的结构特点及应用	58
第三节 冷却装置的结构特点及应用	88

第二篇 变压器的检修

第五章 变压器检修的总则	106
第一节 掌握设备的结构和运行特点	106
第二节 标准项目检修的内容	107
第三节 非标准项目检修的内容	109
第四节 检修前的准备工作	109
第五节 检修中和检修后的试验	111
第六章 变压器标准项目的检修内容和进程	112
第一节 吊开钟罩的检查或检修	112

第二节	器身检查或检修后的组装	116
第三节	排油和注油	117
第四节	附属装置的大修	119
第七章	变压器非标准项目检修的内容	135
第一节	铁心及其相关部件的故障和检修	135
第二节	拆卸铁心的顺序及注意事项	143
第三节	绕组的故障和检修	144
第四节	短路故障的检查、分析和处理	149
第五节	主绝缘故障的检查和处理	155
第六节	漏磁发热故障的检查和处理	158
第七节	更换绕组的大修改造	160
第八节	主要附件的故障和处理	165
第八章	变压器油的技术要求和处理方法	178
第一节	变压器油的理化性质和技术要求	178
第二节	运行中变压器油的质量标准	181
第三节	变压器油中气体分析对检测变压器故障的应用	183
第四节	变压器油的老化	188
第五节	变压器油的处理	191
第九章	变压器的干燥	197
第一节	概述	197
第二节	常用干燥加热方法比较	198
第三节	在油箱中用涡流加热法进行真空干燥	200
第四节	涡流加热连续热风真空干燥	206
第五节	零序短路真空干燥	208
第六节	热油喷淋和热油循环真空干燥	214
第十章	变压器的大修试验和交接验收	217
第一节	大修阶段的试验	217
第二节	大修后的交接验收	218
第三节	试运行	219

第三篇 变压器的试验

第十一章	变压器试验工作的任务、分类、试验项目、顺序和 要求	221
第一节	试验工作的任务和分类	221
第二节	出厂、型式和特殊试验	222
第三节	试验项目的试验顺序和环境要求	224
第四节	允许的偏差	224

第十二章 变压器的性能和参数测量	227
第一节 变压比测量	227
第二节 连接组试验 (相量关系的校正)	233
第三节 空载损耗和空载电流的测量	239
第四节 阻抗电压、短路阻抗和负载损耗测量	248
第五节 绕组电阻的测量	255
第六节 温升试验	261
第十三章 变压器的绝缘特性和绝缘强度试验	273
第一节 试验的目的和种类	273
第二节 变压器油试验	274
第三节 绝缘电阻、吸收比和极化指数试验	275
第四节 绝缘的介质损耗因数 ($\tan\delta$) 的测量	279
第五节 局部放电试验	284
第六节 外施耐压试验	295
第七节 感应耐压试验	302
第八节 雷电冲击电压试验	309
第九节 操作冲击电压试验	317
第十四章 变压器的特殊试验	324
第一节 声级 (噪声级) 测量	324
第二节 三相变压器的零序阻抗测量	332
第三节 绕组对地和绕组间的电容测量	339
附录	342
附录 A 三相及单相油浸式电力变压器的技术参数	342
附录 B 有关变压器和套管的预防试验规定	355
附录 C 变压器大修后的总结报告格式	362
附录 D 常用的南京电瓷厂和西安电瓷厂生产的 66~220kV 油纸电容式套管的性能和结构尺寸	368
附录 E 几种常用的有载分接开关的结构图形和安装尺寸	377
附录 F 变压器用主要铜材性能和规格	389
附录 G 变压器用主要绝缘材料的规格和性能	392
附录 H 现场变压器渗漏油处理及密封材料	394
参考文献	400

第一篇

变压器器身和主要附件的 结构型式和特点

随着经济的发展,我国的变压器制造业有了长足的进步,无论是主体(包括铁心、引线等)或是主要附件(包括高压套管、分接开关、冷却装置等),在结构型式、技术和性能指标等方面都发生了重大的变化。

为了正确地对它们实施检修(含更新改造)和试验检查,对上述各部分的结构型式和特点进行较为深入的了解和掌握是非常必要的。因此,在本篇中将对变压器器身和主要附件的结构型式和特点进行介绍。

第一章 线圈的结构型式和特点

线圈在电力变压器中是最重要、最复杂的部件,因为它基本上决定了变压器的容量、电压、电流和使用条件。它是由铜(铝)扁导线绕制,再配以专门的绝缘部件组成。

线圈型式主要是根据线圈的电压等级和电流的大小来进行选择,同时还要重点考虑电气强度、机械强度、散热面积和绕制的可能性等等。一般对电压低而电流大的线圈,常用多根扁导线并联绕制成螺旋式线圈;而对于电压等级较高、电流较小,且在纵绝缘上还有其特殊要求的,常可绕制成连续式、纠结式和插入电容的内屏蔽式线圈。

在本章中将叙述各种线圈的结构型式和特点,以了解所适应的电压等级和电流大小的需要,便于对变压器更新改造和局部更换线圈(或线段)操作时参考。

在本章中还将对多根导线并绕的线圈(如螺旋式线圈)的换位问题作详细叙述。如果换位不当,可导致产生较大的循环电流,并有可观的能量消耗,降低了线圈的运行可靠性。而对于电压高、电流小的连续式、纠结式和内屏蔽式线圈等,由于换位引起的附加损耗较小,且这些线圈还有其他一些绕线因素制约,故本章中对它们的换位问题未作叙述。

第一节 线圈的型式和要求

线圈的结构型式主要是根据线圈的电压等级和容量大小来选择,并按照线圈的匝数、尺

寸和截面形状以及并联的导线根数多少来确定。在当前的大型变压器中，饼式线圈成为主要结构型式，这其中包括连续式、纠结式、纠结连续式、内屏蔽连续式和各种螺旋式等。各种结构型式的线圈都必须满足如下的要求。

一、绝缘强度要求

由于变压器在运行中要受到大气过电压和操作过电压的冲击，还要受到运行电压的长时期作用，电气强度至关重要，应该尽大力保证在变压器运行的一生中不发生任何部位的绝缘击穿（闪络放电）。这就要求线圈的设计和制造都必须留有足够的裕度。

二、动稳定要求

变压器在运行中，负载时刻都在变化着，即电流是波动的，线圈都需要承受。当发生短路故障时，还要承受强大的短路电流的冲击。由于线圈导线承受的电磁力与线圈中电流的平方成正比，因此，要求线圈具有足够的机械强度，必须能够承受住强大电磁力的冲击而结构不发生损坏。

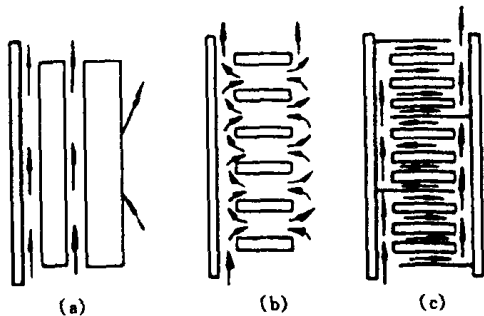


图 1-1 线圈内部油道及油流方向

(a) 垂直油道；(b) 垂直兼有水平油道；
(c) 强迫油循环导向油道

三、散热能力要求

在绝缘结构中，如静电板、静电屏、纸板端圈、角环、隔板等部件均具有由撑条、垫块等组成的满足电气强度的油道，这些油道还必须满足线圈的散热要求。作为线圈的冷却油道，应尽量减少油流的阻力，避免有“死油区”。变压器线圈即使发生短路产生强大的热量，线匝也不至烧毁。通常采

用的线圈内部油道及油流方向如图 1-1 所示。

第二节 饼式线圈的一般规定

饼式线圈的结构型式及导线匝绝缘、段间油道布置除和电流大小有关外，还和电压等级关系极大。例如低电压大电流的螺旋式线圈，其导线之间仅是股电压，匝电压由线段间的油道来承担，所以它的导线匝绝缘只用 0.45mm 的电缆纸就够了。而对高电压等级线圈，除随电压等级的不同而选用不同的结构型式外，还要求选用不同厚度的导线匝绝缘，油道的布置亦有不同要求。

一、几种常用线圈的匝、纵绝缘尺寸

35kV 级及以下连续式线圈，66kV 级及 110~220kV 级线圈的匝、纵绝缘尺寸分别见表 1-1~表 1-5 所示。

一般 66kV 线圈的纵绝缘结构大都采用纠结连续式，其中连续部分导线的匝绝缘为 0.6mm。但当其为外线圈时，在首末端各 2 个线段要在内径侧垫纸条 2~4mm。而当其为内线圈时，首末端各 4 个线段导线的匝绝缘要加厚到 0.95mm。纠结部分线段的导线匝绝缘均为 0.95mm。

在线圈中各线段间的油道尺寸和分布，随变压器的容量、电压等级以及结构型式而有所差异。

对于应用换位导线（或组合导线）绕制的连续式线圈，其纵绝缘结构的布置和要求与上

述型式基本上一致。

表 1-1

35kV 级及以下连续式线圈的匝绝缘和油道绝缘

电压等级 (kV)	≤15 (半连续式)	≤15 (连续式)	35 (半连续式)	35 (连续式)
匝间绝缘 (mm)	全部 0.45			
首末端段间绝缘	全部 1.5mm 纸圈和 4mm 油道交错排列	全部 4mm 油道	1、3、5、7 段间为 2.5mm 纸圈, 2、4、6、8 段间为 6mm 或 4.5mm 油道	6mm 或 4.5mm 油道 6 个
正常部分段间绝缘	全部 1.5mm 纸圈和 4mm 或 3mm 油道交错排列	全部 4mm 或 3mm 油道	全部 1.5mm 纸圈和 4mm 或 3mm 油道交错排列	全部 4.5mm 或 3mm 油道
中断点油道 中部调压时 (mm) 中性点调压线圈反接时 (mm)	8~9 12	8~9 12	9~10 —	9~10 —

表 1-2

66kV 级饼式线圈纵绝缘典型尺寸

适用范围	结构型式	出线方式	匝绝缘 (mm)	总段数	油道排列
容量 ≤ 16000kVA 外线圈	纠结连续式, 首末端各纠结 2 段	端部出线	纠结部分 0.95, 连续部分 0.6	≥ 44 + 8 (8 为分接段)	首末端各 2 段内径垫纸条厚 4~5mm 首末端油道各 2 个宽 6mm 和 7 个宽 8mm, 其余宽 5mm, 分接中断点宽 10mm
容量为 20000 ~ 50000kVA 外线圈	连续式	端部出线	0.6	≥ 44 + 8 (8 为分接段)	首末端各 2 段内径垫纸条厚 4~5mm 两端油道各 4 个宽 8mm 和 4 个宽 6mm, 其余宽 5mm, 分接中断点宽 12mm
容量 ≥ 63000kVA 外线圈	连续式, 分接区为纠结线段	中部出线	连续部分 0.6, 纠结部分 0.95	≥ (32 + 4) × 2 (4 为分接段)	两端各 2 段内径垫纸条厚 4~5mm 油道布置为每半部首末端油道各有 4 个宽 8mm 和 4 个宽 6mm, 其余宽 5mm, 分接中断点 12mm
容量 ≥ 31500kVA 内线圈	连续式	端部出线	两端各 4 段为 0.95, 其余 0.6		两端各有油道 4 个宽 7.5mm, 其余宽 6mm

注 油道排列, 根据波过程计算结果可适当减小, 正常段最小油道宽不得小于 3mm。

表 1-3

110kV 级饼式线圈内线圈纵绝缘典型尺寸

适用范围	结构型式	出线方式	匝绝缘 (mm)	总段数	油道排列	备 注
容量 ≤ 90000kVA, 并联导线 1~2 根	纠结连续式, 并联根数为 2 时采用插花纠	端部出线	1.35	80 段左右, 纠结 12 段	由首末端起分别有 6 个宽 (6~12) mm、6 个宽 8mm, 其余宽 6mm	
容量为 90000 ~ 150000kVA, 并联导线 3~4 根	内屏蔽连续式	端部出线	1.35	80 段左右, 屏蔽 12 段	由首末端起分别为 6 个宽 (8~10) mm, 其余宽 6mm	第 1~2 段屏蔽线在匝间, 3~12 段屏蔽线在并联导线间 每段屏蔽匝数为导线匝数的 60%~70%
容量 ≥ 180000kVA, 并联导线 ≥ 5 根	全连续式, 只有每段匝数 < 3 时采用	端部出线	1.35	80 段左右	正常段每段 3 匝时, 3 个宽 8mm、16 个宽 10mm, 其余宽 8mm 正常段每段 2 匝时, 全部宽 6mm	正常段每段匝数 > 3 时, 应采用内屏蔽连续式

注 1. 110kV 内线圈 A_m 端头 4 段均要垫纸板条。第 1~2 段内垫 10~12mm, 外垫 5~6mm; 第 3~4 段内垫 5~6mm;

2. 采用内屏蔽连续式时, 屏线与工作线间不允许垫纸板条。

续表

适用范围	结构型式	出线方式	匝绝缘 (mm)	总段数	匝数分配	油道排列
高压外线圈 (包括高一低、高一中一低结构)	内屏蔽连续式每半部各屏16段, 为8个3mm厚、4个2mm厚、4个1mm厚 (或8个4mm厚, 4个3mm厚, 4个2mm厚)	中部出线	1.95	$(\geq 42 + 4) \times 2$, 其中4为分接段纠结式	A与分接6之间的匝数为总匝数的60%~70%	由A起依 $7.5/2 + 2 \times (6 + 7.5) + 5 \times (4.5 + 6)$ mm 其他3或4.5mm, 末端3个宽6mm, 中断点宽12mm
自耦变压器的高压线圈	全纠结 (2根及以上并联为插花纠)	中部出线	1.95	$2 \times 40 \sim 2 \times 50$	A与分接6之间的匝数约为总匝数的65%	由A起依次宽为12、26、10、22、8、18、6、14、6、14mm, 其余宽6、10mm交替, 中断点宽32mm
	内屏蔽连续式每半部各屏18段, 即首端8个4mm厚、4个3mm厚、4个2mm厚, 末端2个3mm厚或2个4mm厚	中部出线	1.95	$(\geq 40 + 8) \times 2$, 其中8为纠结式分接段	A与分接6之间的匝数为总匝数的55%~65%	由A起依次2个宽6+10.5mm+5个4.5+6mm, 其余4、5或6mm, 末端3×6mm, 中断点宽21mm

注 1. 高压外线圈上、下两端第1~2线段内垫10mm, 第3~4线段内垫5mm; 若主空道宽小于84mm时, 首端也要有4段内垫, 垫法同前。
2. 高压线圈Ⅱ首端第1~2线段内垫10~12mm, 外垫5~6mm, 第3~4线段内垫5~6mm。
3. 自耦变压器高压线圈末端两线段内垫5mm并加小角环

在110kV级线圈的匝、纵绝缘结构中, 主要采用纠结连续式或内屏蔽连续式。导线的匝绝缘厚为1.35mm, 屏线绝缘厚一般不小于2mm。

在220kV级线圈的匝、纵绝缘结构中, 主要采用纠结连续式 (过去曾为全纠结式) 或内屏蔽连续式, 只有当它们是内线圈时才可以采用连续式或其他结构型式。导线匝绝缘一般为1.95mm, 对端部出线的内线圈首端线段为2.25mm, 正常部分不小于1.35mm。

二、线圈结构上的一般原则

(1) 每个线段 (饼) 的匝数均为实绕匝数, 而在线圈匝数简图中表示的是电气匝数 (总匝数、分接匝数)。

(2) 在绕制时, 线段的种类和垫纸条的匝数要尽量少, 垫纸条线段的纸条总厚度应不超过线段辐向尺寸的1/3。一般纸条应垫在正段匝间, 但首末端线段由于主、纵绝缘的要求, 所垫纸条的位置应符合设计要求。

表 1-6 线段辐向尺寸
允许的偏差 (mm)

线段辐向尺寸	≤60	61~100	≥100
少数线段辐向偏差	≤1	≤1.5	≤2

(3) 线段的辐向尺寸应尽量达到一致。设计允许的偏差见表1-6。

外线圈在不影响主绝缘的情况下, 允许在换位处高出一根导线; 而引出头和分接头处则允许高出两根导线。纠结式线圈要尽量使纠位和连位不出现“爬坡”, 或有“爬坡”也不得超出一根导线。

第三节 螺旋式线圈的型式和特点

螺旋式线圈的结构组成同连续式线圈。它的主要特点是并联导线的根数多，线饼绕成螺旋状，且一个线饼即一匝的线圈。所以螺旋式线圈在结构上取决于并联多根导线的换位和油道布置。

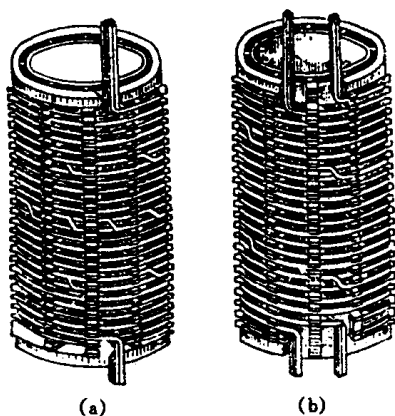


图 1-2 螺旋式线圈结构示意图
(a) 单螺旋式；(b) 双螺旋式

螺旋式线圈具有较好的机械稳定性、散热性和工艺性，被普遍应用于变压器的低电压大电流线圈。根据线圈电流的大小，可以绕制成单、双、三、四螺旋式，也可绕制成油道与线段交替布置的半螺旋式，其结构示意图如图 1-2 所示。

一、单螺旋式线圈的换位

单螺旋式线圈的换位方式如图 1-3 所示。可见，当导线轴向并联绕制时 [见图 1-3 (a)]，不仅并联的导线长度相等，而且在轴向漏磁密度 B_m 的感应电势也相等，因此，线圈不换位也无循环电流。而当并联导线为辐向绕制时 [见图 1-3 (b)]，其外径侧的导线要长，使每根导线的电阻值不一样。又由于线圈的漏磁场分布是呈近似三角形，靠近主空道的导线处于漏磁密度较高的位置，因此，

感应出的漏电势比距主漏磁空道远处的导线要大，这样就将在各导线间存在着电位差并引起循环电流，使线圈的附加损耗加大。为了消除这些不良影响，对并联在内外侧的导线常要进行几次换位。

(1) 进行一次标准换位：单螺旋式线圈在总匝数 W 的 $1/2$ 处（换位中心）只进行一次换位，即一次“标准换位”。它可使并联导线完全对称互换，达到导线在长度上一致。

当 2 根导线并联绕制时，由图 1-3 可见，只这样进行一次“标准换位”，即可使导线所占的漏磁位置相同，无漏磁电位差形成的循环电流。

当 3 根及以上导线并联绕制时，一次“标准换位”虽可使每根导线的长度达到一致，但每根导线所占的漏磁位置却不相同了。以 4 根并联导线为例（见图 1-4），导线 1、4 所占有的漏磁场位置①、④各为 $W/2$ 匝，而导线 2、3 所占有的漏磁位置②、③亦为 $W/2$ ，但各根导线的感应电势并不一致。由设计资料可知，各根导线的漏磁感应电势为

$$\Delta E_1 = \Delta E_4 = \frac{W}{2} K_e (4r + 12.5a) a B_m / 4$$

$$\Delta E_2 = \Delta E_3 = \frac{W}{2} K_e (4r + 8.5a) a B_m / 4$$

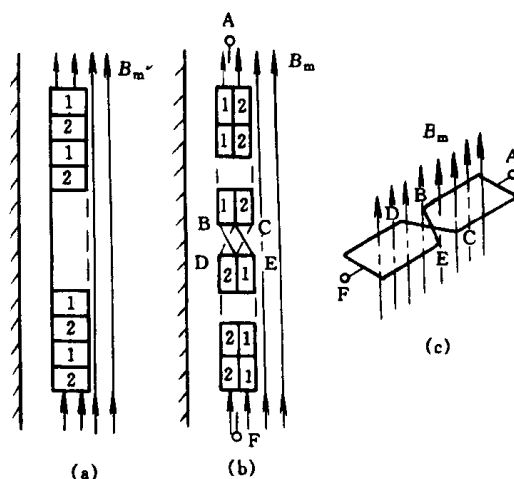


图 1-3 导线的并联方式
(a) 轴向导线并联；(b) 辐向导线并联；
(c) 图 (b) 的展开图

式中 $K_e = 2\pi 4.44 f = 2 \times 3.14 \times 4.44 \times 50$

可见, $\Delta E_1 = \Delta E_4 > \Delta E_2 = \Delta E_3$, 即循环电流由导线 1、4 流向导线 2、3。因此, 对 3 根及以上导线并联时, 一次“标准换位”是不完全的。

(2) “2、1、2”换位: 是通常应用的多根导线并绕的方法, 它把并联的导线分成两组 (两组根数之差不大于 1), 在一次“标准换位”的基础上, 再在总匝数的 1/4 和 3/4 处各进行一次“特殊换位”, 其结构示意图如图 1-5。

“2、1、2”换位法对 4 根并联的导线换位是完全的 [见图 1-5 (a)]。可见 1~4 根导线占漏磁位置①~④各一次, 且均为 $W/4$, 所以它们的长度均相等, 各漏磁电势也都相等, 各导线中无循环电流。

“2、1、2”换位法对 5 根及以上并联的导线换位是不完全的, 以图 1-5 (b) 的 8 根并联导线为例, 所有导线均占 4 个漏磁位置各 $W/4$ 匝, 长度是相等的, 但是由于各自所占的漏磁位置不同, 则:

导线 1 (或导线 4、5、8) 在整个线圈中的漏磁电势

$$\Delta E_1 = \frac{W}{4} K_e (16r + 89a) a \frac{B_m}{8}$$

导线 2 (或导线 3、6、7) 在整个线圈中的漏磁电势

$$\Delta E_2 = \frac{W}{4} K_e (16r + 81a) a \frac{B_m}{8}$$

显然, $\Delta E_1 > \Delta E_2$, 循环电流将由导线 1、4、5、8 流向导线 2、3、6、7。

(3) “4、2、4”和“2、4、2”换位法: “4、2、4”换位法是把并联的导线分成 4 组, 在总匝数的 1/4 和 3/4 处组间进行换位, 组内导线位置不变; 合成两组在总匝数 1/2 处, 组内导线进行一次“标准换位”。所以, “4、2、4”换位要求并联导线为 4 的倍数。

“4、2、4”换位法对 8 根并联导线的换位是完全的, 见图 1-6 (a)。导线 1、4、6、7 各占漏磁位置①、④、⑥、⑦各 $W/4$ 匝; 导线 2、3、5、8 各根导线占漏磁位置②、③、⑤、⑧各 $W/4$ 匝, 它们的长度相等, 而漏磁电势由计算可得

$$\Delta E_1 \sim \Delta E_8 = \frac{W}{4} K_e (16r + 85a) a \frac{B_m}{8}$$

各导线的漏磁电势也相等, 各导线间无循环电流产生。

“4、2、4”换位法对并联 12 根及以上的导线换位是不完全的。以图 1-6 (b) 的 12 根并

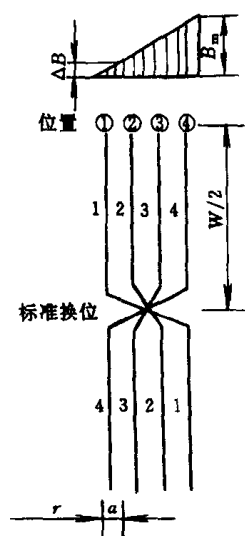


图 1-4 一次标准换位

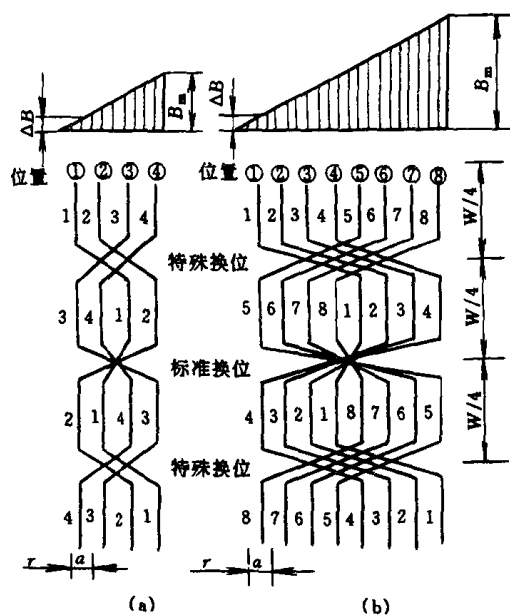


图 1-5 “2、1、2”换位结构示意图
(a) 4 根并联; (b) 8 根并联

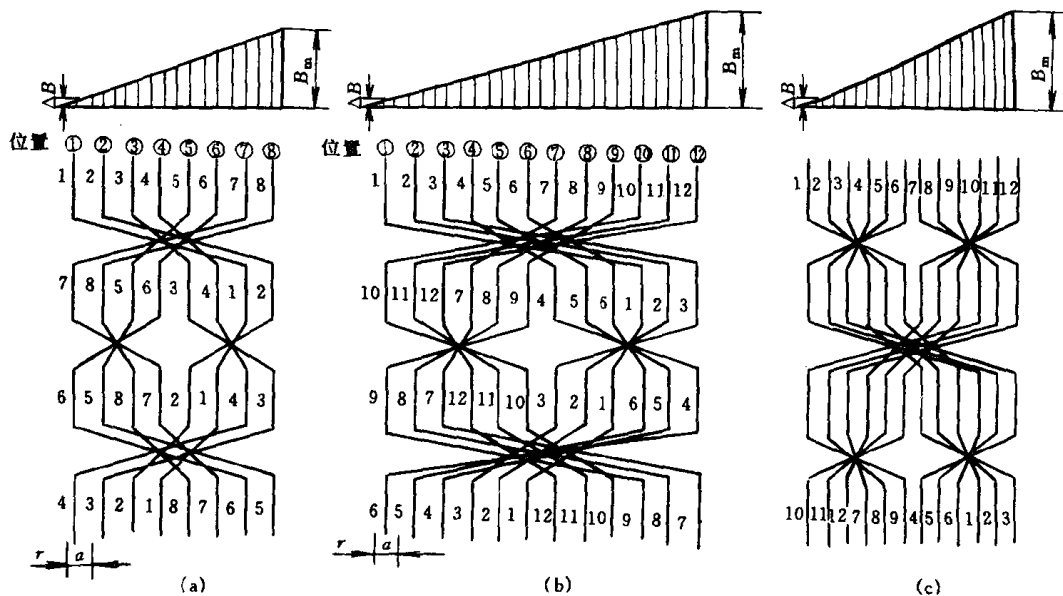


图 1-6 “4、2、4”换位 (a、b) 和“2、4、2”换位 (c)

(a) 8根并联; (b) 12根并联之一; (c) 12根并联之二

联导线为例, 所有导线均占 4 个漏磁位置各 $W/4$ 匝, 长度是相等的, 但是导线 1 (或导线 6、9、10)、导线 2 (或导线 5、8、11) 和导线 3 (或导线 4、7、12) 在整个线圈中的漏磁电势为

$$\Delta E_1 = \frac{W}{4} K_e (24r + 193a) a \frac{B_m}{12}$$

$$\Delta E_2 = \frac{W}{4} K_e (24r + 189a) a \frac{B_m}{12}$$

$$\Delta E_3 = \frac{W}{4} K_e (24r + 193a) a \frac{B_m}{12}$$

显然, $\Delta E_1 = \Delta E_3 > \Delta E_2$, 此时将有循环电流由导线 1、6、9、10 或导线 3、4、7、12 流向导线 2、5、8、11, 不过其数值较小。

“4、2、4”换位法多用于特大型变压器中的螺旋式线圈, 由于漏磁通量很大, 各组间漏磁电势仍然较高, 因此, 在各组导线间常加垫纸条。另外, 2 个四组特殊换位的楔形垫块在放置时较为困难, 如稍有疏忽, 极易卡破导线绝缘。图 1-6 (c) 是“4、2、4”换位法的变种, 可称“2、4、2”换位法。它只有 1 个四组特殊换法, 而由于换位不完全引起的附加损耗却与“4、2、4”相同, 但在制造工艺上较为容易。

由于线圈端部轴向漏磁通减小而辐向漏磁通增大, 上述等匝的换位方法, 使导线在线圈的两个端部区域的漏磁电势比只考虑轴向漏磁通的值要小些, 而循环电流和不完全换位损耗要大些。为此, 可将线圈中的两个端部换位区的匝数取得比中部换位区的匝数多一些。

由上述可知, 当变压器的容量较大时, 其低压线圈用更多根导线并绕, 不仅漏磁场下的循环电流引起的附加损耗问题不易解决完善, 而且在制造工艺上也是比较困难的。因此, 相应地双螺旋式、三螺旋式及四螺旋式线圈都相继地诞生了。

二、双螺旋式线圈的换位