

变压器线圈制造

沈阳变压器研究所 编

机械工业出版社

本书主要根据国内变压器线圈的生产实践编写而成，同时也简要介绍了国内外变压器制造行业近年来所采用的最新线圈结构。全书包括线圈结构、线圈绝缘、线圈计算与设计、线圈制造工艺及各类线圈绕制方法等方面的内容，而重点放在线圈制造工艺及绕制方法上。

本书可供从事变压器制造、变压器维护的工人、工程技术人员参考使用。

变压器线圈制造

沈阳变压器研究所 编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $12\frac{3}{4}$ · 字数 279 千字

1983 年 2 月北京第一版 · 1983 年 2 月北京第一次印刷

印数 00,001—15,300 · 定价 1.60 元

*

统一书号：15033·5406

前 言

为了适应我国变压器行业的迅速发展和满足广大电工行业工人、工程技术人员的迫切需要，结合我国变压器生产实践，我所组织编写了《变压器线圈制造》这本书。

编写过程中，我们力求理论联系实际，在关键部分，通过实例加以说明，并引用大量插图，使得参考起来更加清晰、明了。同时，书中也引用了国内外变压器制造行业近年来采用的最新线圈结构，可供借鉴。

书中所引用的资料、表格、数据大多数取自国家标准、部标准及工厂标准。

本书第一章由高兴耀同志执笔，第二、三章及附录部分由刘传彝同志执笔，第四、五、六章由王仁兴同志执笔，全书由郑时伊、刘传彝二同志修改和补充，并经刘连庆同志审查。

一九七二年，沈阳变压器厂为满足工人、工程技术人员学习的需要，曾组织编写过一本《变压器线圈制造》（在变压器行业内部发售）。这次我们重新编写，参考了该书，并引用了书中部分图表，为此，我们仅向原编写《变压器线圈制造》的同志表示感谢。

本书在编写过程中，得到沈阳变压器厂等单位的支持和帮助，在此表示感谢。由于我们的业务水平不高，书中错误和不足之处一定很多，希望读者给予批评指正。

沈阳变压器研究所

目 录

第一章 线圈的结构	1
第一节 对线圈的基本要求	1
一、电气强度	1
二、耐热强度	6
三、机械强度	11
四、对经济、技术性能的要求	16
第二节 线圈的绕向和连接组	17
一、绕向	17
二、极性	19
三、连接图和连接组	22
第三节 并联导线的换位	32
一、多根并联圆筒式线圈的换位	33
二、多根并联连续式（包括纠结式、内屏蔽式） 线圈的换位	33
三、单螺旋式线圈的换位	36
四、双螺旋式线圈的换位	43
五、换位导线	44
第四节 圆筒式线圈的基本结构	45
一、双层圆筒式和多层圆筒式	45
二、两段圆筒式	48
三、分段圆筒式	50
四、铝箔筒式	52
五、单层圆筒式	52
第五节 饼式线圈的基本结构	53
一、连续式和半连续式	53
二、纠结式	56

三、内屏蔽式	63
四、螺旋式	64
五、交叠式	66
六、“8”字线圈	66
第二章 线圈的绝缘	68
第一节 线圈绝缘的分类	68
第二节 线圈各点电位和各点间梯度	69
一、工频试验时的电位和梯度	69
二、冲击试验时的电位和梯度	72
第三节 线圈绝缘的电气强度	74
一、线圈之间主绝缘电气强度	75
二、线圈端绝缘电气强度	80
三、线圈纵绝缘电气强度	86
第四节 线圈的波过程	93
一、研究线圈波过程的必要性	93
二、线圈的简化电容等值电路的分析	93
三、最终分布和线圈的最大对地电位	100
第五节 线圈的过电压保护	102
一、变压器线圈内部保护的必要性	102
二、变压器线圈内部保护的原则	102
三、线圈内部保护的主要措施	104
第六节 线圈的冲击特性	114
一、圆筒式线圈的冲击特性	114
二、连续式线圈的冲击特性	115
三、纠结式线圈的冲击特性	117
四、纠结连续式线圈的冲击特性	118
五、内屏蔽连续式线圈的冲击特性	121
六、分区结构线圈的冲击特性及补偿方法	122
第七节 主绝缘结构	130

VI

一、0.5~40 千伏级主绝缘结构	130
二、60~110 千伏级主绝缘结构	131
三、220 千伏级主绝缘结构	144
第八节 纵绝缘结构	146
一、35 千伏级及以下的纵绝缘结构	147
二、60~110 千伏级纵绝缘结构	148
三、220 千伏级纵绝缘结构	152
第三章 线圈的设计与计算	153
第一节 对线圈设计的基本要求	153
第二节 线圈有关数据的计算	154
一、匝数的确定	154
二、线圈型式的选择	155
三、线圈纵绝缘的设计	156
四、导线和电流密度的选择	158
五、线圈的排列	159
六、阻抗、损耗、温升、短路性能及其计算	161
第三节 线圈结构设计任务及要求	184
一、线圈结构设计任务	184
二、圆筒式线圈的一般规定	184
三、饼式线圈的一般规定	185
四、实绕匝数与实际匝数	190
第四节 不同线圈结构展开图画法	190
一、圆筒式线圈	190
二、单螺旋、单半螺旋线圈换位及展开图画法	191
三、双螺旋、双半螺旋线圈换位及展开图画法	193
四、连续式线圈	198
五、纠结式线圈展开图画法	199
六、内屏蔽连续式线圈	201
第五节 绝缘件与结构件	201

一、圆筒式线圈绝缘件与结构件	201
二、有关垫块的规定	202
三、有关撑条的规定	202
四、绝缘圈、端圈、静电板尺寸	202
第六节 图样标准化问题	202
第四章 线圈的绕制	204
第一节 绕制线圈前的工艺准备工作	205
一、图纸、技术条件和工艺规程	205
二、工艺装备	205
三、电磁线	209
四、绝缘零件的准备	213
第二节 圆筒式线圈的绕制	213
一、低压圆筒式线圈的绕制	213
二、高压圆筒式线圈的绕制	221
三、特殊结构的圆筒式线圈的绕制	228
第三节 螺旋式线圈的绕制	234
一、单螺旋式线圈的绕制	234
二、双螺旋式线圈的绕制	242
三、采用“424”换位的单螺旋式线圈的绕制	244
四、调压线圈的绕制	245
五、用作分裂线圈的螺旋式线圈	250
第四节 连续式线圈的绕制	252
一、有关的技术术语	252
二、绕制连续式线圈的一般技术要求	255
三、绕制连续式线圈的基本操作过程	258
四、绕制实例	270
第五节 纠结式线圈的绕制	295
一、有关的技术术语	295
二、纠结单元的绕制原理	296

三、基本纠结单元的绕制	300
四、部分纠结式线圈的绕制	338
五、绕制纠结式线圈的工艺要求	340
第六节 内屏蔽式线圈的绕制	341
第七节 线圈的整形、压紧和浸漆处理	342
一、圆筒式线圈的套装及压紧	342
二、饼式线圈的套装	344
三、线圈的干燥处理	347
四、线圈的压紧	348
五、线圈的浸漆	349
六、线圈浸漆后的烘干	350
七、干式变压器线圈的浸漆处理	350
八、一般技术要求	351
第五章 线圈内部导线的焊接	352
第一节 一般技术要求	352
一、圆导线的焊接	352
二、扁导线的焊接	353
三、其它要求	353
第二节 搭接银铜焊	355
一、焊料	355
二、焊接变压器	355
三、铜焊夹子	355
四、搭接焊的工艺过程	355
第三节 对接电阻焊	357
一、电阻对焊机的基本构造	357
二、对接电阻焊的操作过程	359
三、对接电阻焊的质量检验	360
四、对焊接头的加工	362
五、铜-铜电阻焊的两种情况比较	362

第六章 线圈的质量检查	363
第一节 线圈用绝缘件的质量标准	363
一、外观检查要求	363
二、平尾垫块	363
三、端圈类	363
四、静电板	363
五、电木筒	363
第二节 线圈的质量标准	365
一、圆筒式线圈	365
二、饼式线圈	366
第三节 小型线圈匝数的测量	367
第四节 纠结式线圈的检查	370
一、绕制纠结单元时容易产生的错误	370
二、两根导线绕制的普通纠结式线圈	370
三、四根导线并绕插花纠结式线圈	371
四、六根导线并绕插花纠结式线圈	374
第五节 多根导线并绕线圈中短路点的确定	376
附录	378
附录 I 变压器产品的分类和型号	378
附表 1 电力变压器的分类和型号	378
附表 2 主要的特种变压器的用途和分类	378
附录 II 常用电力变压器主要系列产品技术数据	379
附表 3 SJL ₁ 型 10 千伏电力变压器技术数据	379
附表 4 SJL ₁ 型 35 千伏电力变压器技术数据	380
附表 5 110 千伏双线圈电力变压器技术数据	381
附表 6 110 千伏三线圈电力变压器技术数据	382
附表 7 220 千伏双线圈电力变压器技术数据	383
附表 8 220 千伏三线圈电力变压器技术数据	384
附表 9 220 千伏自耦电力变压器技术数据	384

附录Ⅱ 变压器用导线的型号和规格	386
附表 10 纸包电磁线型号	386
附表 11 Z、ZL 型纸包圆线的标称直径、截面	386
附表 12 ZB、ZLB 型纸包扁线的标称尺寸、截面	388
附表 13 QQ-2 型漆包圆线规格及常用数据	392
附录Ⅳ 绝缘纸板、电缆纸、变压器油的性能和规格	393
附表 14 绝缘纸板的规格和允许偏差	393
附表 15 绝缘纸板的技术要求	393
附表 16 DLZ 电缆纸的规格和技术要求	394
附表 17 皱纹纸的规格和技术要求	394
附表 18 变压器油的技术指标	395
附录Ⅴ 常用导电材料和绝缘材料的物理性能	396
附表 19 常用导电材料的物理性能	396
附表 20 常用绝缘材料的物理性能	397

第一章 线圈的结构

第一节 对线圈的基本要求

线圈是变压器的心脏，是变压器变换和输配电能的中枢。要保证变压器长期安全可靠地运行，对变压器的线圈，必须保证以下基本要求：

一、电气强度

在变压器长期运行中，其绝缘（其中最主要是线圈的绝缘）必须能可靠地承受住以下四种电压的作用，即大气过电压、操作过电压、暂态过电压和长期工作电压。操作过电压与暂态过电压统称内过电压。

1. 大气过电压（冲击过电压）

自然界的雷击，一闪即逝（仅几至几十微秒），但雷电的电压（峰值）甚高，可达 1000 千伏以上，雷电流也很大，大到 100 千安以上。如果雷电直击变压器，必然要损坏变压器。因此，运行中的变压器是不能直接承受雷击的。为达此目的，在变电所四周装设避雷针，在变电所内离变压器最近的主接线上装设阀式避雷器保护，在架空线上（部分或全部）装设接地的避雷线……等。这样，电力系统中由雷电作用而引起的大气过电压，是雷电波作用于离变电所有一定距离的架空线后侵入变电所，在变电所内先作用于避雷器后再作用于变压器上的冲击电压，显然其强度比雷电直击要低得多。

雷电波由架空线侵入变电所后，如其峰值超过避雷器的放电电压，则避雷器动作，雷电流经避雷器入地，在避雷器

阀片电阻上产生雷电流压降，称残压。雷电流一般在 5~10 千安范围内。这个残压再作用于变压器上。由于避雷器与变压器之间因安装需要有一段距离，残压在作用到变压器前在这一小段距离上有振荡而略有升高，因此，实际上作用于变压器上的冲击电压比避雷器残压要略高一些。

国家标准《高压电气设备绝缘试验电压和试验方法》中所规定的全波冲击电压（图1-1），就是由避雷器

的残压直接确定的（表 1-1）。由表 1-1 可以看出：全波冲击电压要比变压器的工作电压高若干倍。变压器的线圈必须保证能承受住标准规定的全波冲击电压试验。

上述国家标准中同时还规定了截波冲击电压（图 1-2）试验。这是考虑大气过电压作用过程中，可能发生电气设备外绝缘放电（闪络），即将全波截断的情况。由表 1-1 可看出：截波

冲击试验电压比全波冲击试验电压约高 15%。变压器的线圈必须保证能承受住标准规定的截波冲击电压试验。

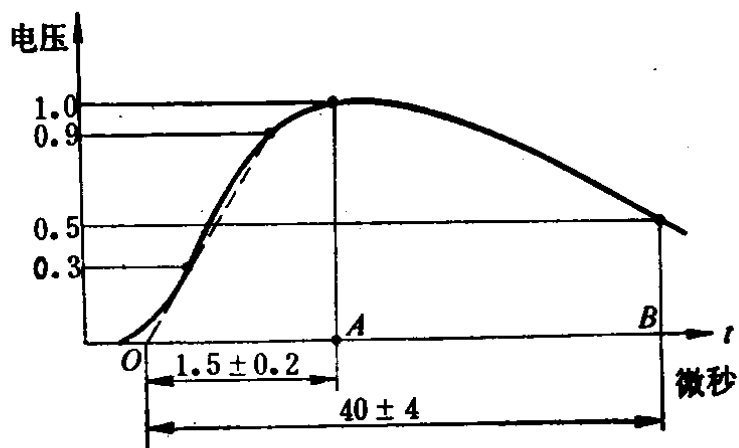


图1-1 全波波形

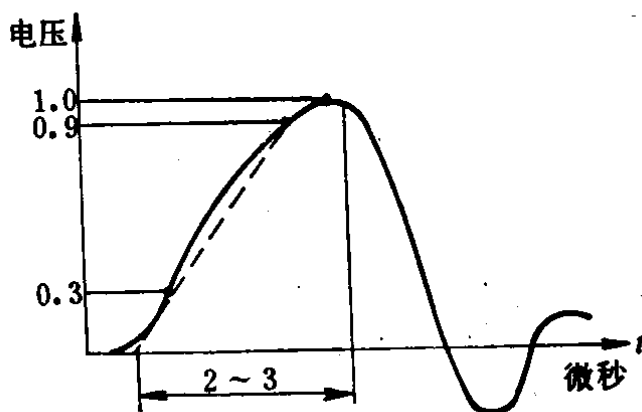


图1-2 截波波形

表1-1 变压器的冲击试验电压

系统额定电压（千伏，有效值）	6	10	35	60	110	220		
系统最高工作电压（千伏，有效值）	6.9	11.5	40.5	69	126	252		
系统情况①	全绝缘				半绝缘			
避雷器5千安冲击电流的残压（千伏，峰值）不大于②	27	45	134	227	332③	332	664	
变压器励磁时的冲击试验电压（千伏，峰值）④	全波	60	80	200	330	480	480	945
	截波	70	90	225	390	550	550	1090
变压器中性点冲击试验电压（千伏，峰值）			140	235		180	400	

注：① 全绝缘即中性点小电流接地，半绝缘即中性点大电流接地（下同）；
② 摘自避雷器标准JB487-64和JB1468-64；
③ 用磁吹避雷器保护；
④ 摘自国家标准GB311-64。

2. 操作过电压

电力系统的正常操作过程（如空载变压器或空载长线路的投入与切除等）会出现过电压，称之操作过电压。这种过电压是一种衰减振荡波，持续时间较短。

3. 暂态过电压

系统突然失去负载或单相故障接地、电弧接地、铁磁谐振等情况会出现这种过电压，通常可达额定电压的1.3~1.5倍，作用时间不足一秒至数十秒。这种过电压对避雷器参数和系统绝缘水平的确定起着重要作用。

操作过电压和暂态过电压统称内部过电压，内部过电压也是工作电压的若干倍，工程上内部过电压用“相”的最高工作电压的倍数表示。我国各种电压等级的电力系统的内部过电压倍数列入表1-2。

表1-2 变压器的工频试验电压

系统额定电压 (千伏, 有效值)	6	10	35	60	110	220	
系统最高工作电压(千伏, 有效值)	6.9	11.5	40.5	69	126	252	
系统情况	全 绝 缘					半绝缘	
内部过电压倍数	4.6	4.25	3.8	3.6	约3.6②	3.2	3.0
变压器工频试验电压① (千伏, 有效值)	25	35	85	140	230	200	400
变压器中性点工频试验电压(千伏, 有效值)	同线端试验电压					85	200

注: ① 取自国家标准GB311-64;

② 用磁吹避雷器保护。

国家标准《高压电气设备绝缘试验电压和试验方法》中, 规定了变压器工频一分钟试验电压 (表 1-2), 这个试验电压值是按内过电压或大气过电压折合过来的, 其中 ≥ 60 千伏级是由内部过电压按等值概念 (即所谓内部过电压冲击系数) 确定的, ≤ 35 千伏级是由大气过电压按等值概念 (即所谓大气过电压冲击系数) 确定的。变压器线圈必须保证能承受住国家标准规定的工频试验电压[⊖]。

4. 长期工作电压

变压器在长期工作电压作用下, 其绝缘不得有游离现象,

⊖ 一分钟工频试验是我国国家标准“电力变压器”中规定的出厂试验项目, 是考核绝缘的必试项目之一。但此项试验对变压器的纵绝缘的考核是不够严格的, 尤其是对高电压的产品。经常会遇到这样的情况: 已被冲击试验将纵绝缘损坏的变压器, 复试工频试验仍合格。

国外已有这样的建议: 对高电压产品, 取消一分钟工频试验, 改作250/2500微秒单极性冲击波试验 (IEC建议) 或以振荡波作操作波冲击试验。有些国家和制造厂, 对高电压的变压器不作一分钟工频试验, 而以1.4~1.5倍额定电压进行一小时空载励磁试验代替。

更不得有局部放电或击穿发生。因此，电压较高的线圈的出头，引线直径不得过细，并有一定厚度的绝缘覆盖；线圈内外表面电力线集中的地方，尤其是高电压产品，往往都有隔板、角环，端部有静电板等。

线圈的匝间也有一定的工作电压，导线的匝绝缘必须在此工作电压下长期运行，不得有游离。导线匝绝缘游离电压的一般值列于表 1-3。

表1-3 匝绝缘游离电压一般值（千伏，有效值）

匝绝缘厚度（毫米）		0.45	0.95	1.35	1.95	2.95
工艺过程	真空干燥，一般浸油	2	2.5	3	—	—
	真空干燥，真空浸油	—	3	4	5	6

虽然试验研究表明，匝绝缘在有一定游离的状态下，长期运行也没有损坏，但从确保安全运行角度出发，匝绝缘的长期工作电压，建议至少应比表 1-3 数值低 10~15%。

要保证变压器线圈有足够的电气强度，除采用合适的线圈绝缘结构，设计的数据充分可靠外，制造线圈的工艺过程、使用的材质优劣以及工艺环境等对线圈绝缘的电气强度也有决定性的影响。因此，在线圈的整个制造过程和装配过程中，必须注意以下几点：

（1）导线规格及其绝缘必须符合要求，导线本身应无毛刺、夹角、裂纹；绝缘无破损、跑层；焊接质量绝对可靠；

（2）线圈的所有绝缘（包括匝绝缘、层绝缘、油道绝缘和主绝缘等）应符合要求，在整个制造过程中要保持清洁，不得有导电粉尘夹杂，存放处应干燥防尘；

（3）线圈制造中换位、衬垫和绑扎等要合适，确保线

圈压紧和运行中不致损坏匝绝缘；

(4) 不同电压等级的线圈绝缘的干燥和浸油处理（指器身处理）必须符合规定。真空浸油、真空注油比一般浸油匝绝缘强度可提高 30% 以上，油道强度可提高 10% 以上，主绝缘强度可提高 20~30%，因此规定为真空浸油真空注油的产品不可按一般浸油处理。目前，一般说来， ≤ 35 千伏级产品为一般浸油，60~110 千伏级产品为真空浸油， ≥ 220 千伏级产品为真空浸油、真空注油；

(5) 规定不浸漆的高电压试验变压器和特高电压的电力变压器线圈，不可浸漆处理，这是因为这些线圈的固体绝缘通常较厚，不易浸透，易在绝缘中夹杂残留气泡致使绝缘击穿，同时浸漆会使纸质匝绝缘的电气强度降低 20% 以上。

二、耐热强度

线圈的耐热强度包含两方面：其一，在长期工作电流产生的热作用下，线圈绝缘的使用寿命应不少于二十年；其二，变压器在运行条件下，在任意线端发生突然短路，线圈应能承受住此短路电流所产生的热作用而无损伤。

1. 线圈绝缘的使用寿命

变压器、电机、电器运行时，其所用的绝缘有许多因素同时作用着，例如温度、湿度、电场、机械振动、机械冲击力、周围大气或介质，以及由于温度变化所导致的热膨胀应力等因素。在正常运转条件下，决定性的因素是温度、湿度、氧气、电场作用、机械振动和热冲击。在这些因素作用下，绝缘材料的各种性能逐渐变化（俗称老化），最后至不能保证安全运行。变压器、电机、电器用绝缘材料的耐热分级，是以正常运行条件下所作用的各项因素为基础，主要按能够长期使

用的极限温度来区分。所谓长期使用，是指在某一温度下能获得的经济使用寿命。对于变压器、电机、电器用的绝缘材料的经济使用寿命，一般确定为 20 年。老化了的绝缘，其电气强度只略有降低，其机械性能却明显降低，绝缘是否老化，主要是以其机械性能的变化来判断的。从外观判断，老化了的绝缘，颜色变深；出现自然龟裂、脆化、脱落等现象。

绝缘材料的耐热分级和长期使用的极限温度列于表 1-4。极限温度系指最热点温度。

根据长期使用的经验，由于变压器的电压较高、电场作用较强等因素，要保证变压器的使用寿命不低于 20 年，其所用绝缘材料的长期使用的极限温度，实际比表 1-4 的数值略低，例如油浸式变压器的绝缘（A 级）长期使用的极限温度，根据运行经验应为 98℃。

表 1-4 绝缘材料的耐热分级

耐热分级	A	E	B	F	H
极限温度(℃)	105	120	130	155	180

显然，绝缘长期运行的温度低，绝缘老化慢，使用寿命长，反之，长期运行的温度高，绝缘老化快，使用寿命短。

变压器绝缘的使用寿命和长期运行温度的关系，根据运行经验，可用下式表示

$$A = 20 \times 2^{\frac{98}{6}} \times 2^{-\frac{t}{6}} \text{ (年)} \quad (1-1)$$

式中 t ——绝缘运行温度 (℃)，不超过 140℃。

由上式可看出：

(1) 当 $t = 98^\circ\text{C}$ 时，使用寿命 $A = 20$ 年（正好是经济