

BIANYAQI
JIANXIU JISHU

变压器

检修技术

张学武 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

BIANYAQI
JIANXIU JISHU

变压器

检修技术

常州大学
藏书

张学武 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书依据《电力工人技术等级标准》和《中华人民共和国职业技能鉴定规范》中对变压器检修工的相关要求,结合电力生产实际,系统地介绍了变压器的基本结构、运行专业知识和检修的基本技术原理。全书共 11 章,主要内容包括变压器综述、变压器运行原理、变压器检修概论、变压器铁芯的检修、变压器绕组的检修、变压器渗漏油处理及密封材料、变压器附属装置的检修、变压器的干燥、变压器油、互感器的原理及检修、变压器试验。

本书适用于从事变压器检修、安装、运行的人员参加培训鉴定和自学时使用,也可供有关工程技术人员和电力院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器检修技术/张学武编. —北京:中国电力出版社, 2011. 2

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1399 - 6

I. ①变… II. ①张… III. ①变压器-检修 IV. ①TM407

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 025324 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 9.5 印张 250 千字

印数 0001—3000 册 定价 23.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

变压器检修工作的实际内容千头万绪，涉及方方面面，对不同的技术等级有不同的要求，但在工作和学习中，各个技术级别之间并没有明显的界限，很多技术知识是各个级别都需要掌握的。

本书依据原能源部颁布的《电力工人技术等级标准》和原劳动和社会保障部颁发的《中华人民共和国职业技能鉴定规范》中对变压器检修工的相关要求，并力求结合电力生产的实际编写而成，系统地介绍了变压器的基本结构、运行专业知识和检修的基本技术原理，重点阐述了变压器检修工作中常见问题的检查、分析、判断和处理，同时内容兼顾检修对象所涉及的各个时期生产的设备。本书内容循序渐进，在文字叙述上力求严谨、简洁、通俗，将概念、知识、技能融为一体，避开烦琐的数学推导，有利于读者掌握变压器运行和检修的原理，提高分析解决变压器检修安装工作中技术问题的能力。

本书由湖北省电力公司生产技能培训中心张学武编写，书中的局限性和不妥之处，恳请读者指正。

前言

第一章 变压器综述	1
第一节 变压器的作用	1
第二节 变压器的基本工作原理	1
第三节 变压器的分类	2
第四节 变压器的基本结构	4
第五节 变压器的铭牌	22
第二章 变压器运行原理	25
第一节 变压器空载运行	25
第二节 变压器负载运行	33
第三节 三相变压器	44
第四节 变压器并联运行	56
第五节 变压器的过电流现象	58
第六节 变压器的过电压现象	62
第三章 变压器检修概论	68
第一节 检修目的和期限	68
第二节 检修前的准备工作	71
第三节 大修解体和组装步骤	72
第四节 检修时的搬运和起重工作	74
第五节 检修常用材料	76
第六节 故障检测和判断	83
第七节 预防故障的措施	86
第四章 变压器铁芯的检修	92
第一节 铁芯叠装质量对其性能的影响	92

第二节	铁芯常见故障缺陷及检修方法	93
第三节	拆卸铁芯的顺序及注意事项	98
第五章	变压器绕组的检修	100
第一节	绕组的技术要求	100
第二节	绕组的型式特点及有关计算	102
第三节	变压器检修时绕组的检查	107
第四节	短路故障的分析和处理	109
第五节	绕组常见故障及检修方法	112
第六节	变压器绕组的恢复性大修	114
第六章	变压器渗漏油处理及密封材料	126
第一节	对油箱的技术要求	126
第二节	密封材料	128
第三节	渗漏油故障及处理	130
第七章	变压器附属装置的检修	136
第一节	无励磁分接开关的检修	136
第二节	有载分接开关的检修	140
第三节	绝缘套管的检修	147
第四节	油泵的检修	154
第五节	风扇的检修	158
第六节	储油柜的检修	162
第七节	净油器的检修	164
第八节	吸湿器的检修	165
第九节	安全保护装置的检修	165
第八章	变压器的干燥	169
第一节	干燥目的	169
第二节	干燥原理	171
第三节	干燥方法	172
第四节	常用干燥加热方法比较	186
第五节	不干燥检修法	187
第九章	变压器油	192

第一节	变压器油的作用、特点及分类	192
第二节	变压器油的理化性质	194
第三节	变压器油的电气性能及相关指标	196
第四节	变压器油的老化及油性能劣化的原因	198
第五节	防止变压器油劣化的方法	201
第六节	变压器油的处理	203
第七节	变压器油的管理	208
第八节	变压器油的气相色谱分析	213
第九节	变压器油的微量水测定	219
第十章	互感器的原理及检修	222
第一节	互感器的作用及基本原理接线	222
第二节	电流互感器的工作原理及接线方式	223
第三节	电压互感器的工作原理及接线方式	233
第四节	互感器大修项目及准备工作	242
第五节	互感器检修工艺	245
第六节	油浸式互感器用金属膨胀器	257
第七节	SF ₆ 气体绝缘互感器检修	259
第八节	互感器的事故处理	263
第十一章	变压器试验	268
第一节	变压器试验的任务、分类、顺序和要求	268
第二节	变压器性能和参数测量	270
第三节	变压器油的介电强度试验	278
第四节	绝缘电阻、吸收比和极化指数 试验及泄漏电流试验	279
第五节	绝缘的介质损耗因数 $\tan\delta$ 试验	285
第六节	交流耐压试验	289
第七节	感应耐压试验	294
参考文献		296

第一章

变 压 器 综 述

变压器是一种静止的电气设备，它通过电磁感应的作用将一种等级的电压与电流变换成同频率的另一种或几种等级的电压与电流。

第一节 变压器的作用

在电力系统中，变压器是非常关键的电气设备，要将大功率的电能从发电厂输送到远距离的用电区域，通常采用高电压输电，这是因为输送一定功率的电能时，电压越高，线路中的电流就越小，从而可减小输电线路的导线截面、功率损耗和电压波动幅度。受发电机受绝缘水平限制，发电机输出电压不可能设计得太高，因此，需要利用升压变压器将发电机的输出电压升高到输电电压，将电能输送出去。电能输送到用电区域后，为了用电安全，必须利用降压变压器把输电线路上的高压降低到配电系统的电压水平，然后再经配电变压器将电压降低到用户所需电压，供用户使用。显然，电力系统中变压器的总容量比发电机的总容量要大得多，大致比例为 6 : 1 到 8 : 1。

此外，在工业企业的特殊用电设备上，在电能的测试和控制方面，变压器的应用也十分广泛。

第二节 变压器的基本工作原理

变压器是通过电磁感应实现两个电路之间的能量传递的，因

此它必须具有电路和磁路两个基本组成部分。作为电路的是两个(或几个)匝数不等且彼此绝缘的绕组,作为磁路的是一个闭合铁芯,绕组套装在铁芯上且与铁芯绝缘。普通双绕组变压器的工作原理示意图如图 1-1 所示,接电源吸收电能的绕组称为原绕组,又称原边或一次侧,绕组匝数为 N_1 ,接负载输出电能的绕组称为副绕组,又称副边或二次侧,绕组匝数为 N_2 。A、X 和 a、x 分别为原、副绕组的两个出线端的标志。在实际的变压器中,原绕组和副绕组是套装在同一个铁芯柱上的,为清楚起见,原理图上将原、副绕组分别画在两个铁芯柱上。

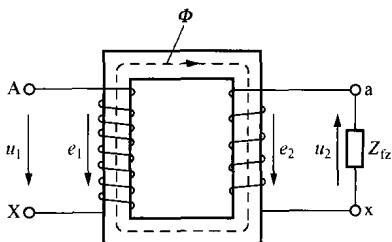


图 1-1 双绕组变压器的工作原理图

如在原绕组 A-X 端施加交流电压 \dot{U}_1 , 则有交流电流流过原绕组,由电流产生的磁势在铁芯中建立交变主磁通 Φ , 交变主磁通同时交链原、副边两个绕组,由电磁感应定律,主磁通随时间变化时,会在原、副绕组中产生感应电势 e_1 和 e_2 , $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$, $e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$, 绕组的感应电势正比于绕组的匝数,通常 $N_1 \neq N_2$, 所以两个匝数不等的绕组就分别得到不同大小的感应电动势,后面将证明,一般电力变压器原绕组的感应电动势接近于外施电压,副绕组的感应电动势则接近于输出端电压,显然,根据需要合理安排原、副绕组的匝数,就能达到变换电压的目的。

第三节 变压器的分类

变压器种类繁多,结构性能差异也很大,一般的分类方式如下:

- (1) 按用途可分为电力变压器和特种变压器。

电力变压器可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器、联络变压器（连接几个不同电压等级的电网）和厂用电变压器（供发电厂自用电）等。容量从几十千伏安到几十万千伏安，电压等级从几百伏到 750kV 甚至更高。

特种变压器可分为电焊变压器、电炉变压器、整流变压器、矿用变压器、高压试验变压器和互感器等。

(2) 按相数分为单相变压器、三相变压器和多相变压器（如整流用的六相变压器）等。

(3) 按冷却方式分为油浸变压器、干式变压器和充气式变压器。

油浸变压器又分为：

1) 油浸自冷变压器。借油的自然对流循环进行冷却。
2) 油浸风冷变压器。在散热器上加装风扇吹风加强冷却。
3) 强迫油循环风冷变压器。利用油泵强迫变压器油加速循环，提高散热能力。

4) 强迫油导向循环风冷变压器。利用油泵通过管道将冷油压送到线圈和铁芯的油道，直接对最需要降温的关键部位先进行冷却。

干式变压器的绕组和铁芯用空气直接冷却。

充气式变压器将绕组和铁芯放在密封铁箱内，箱内充以特殊气体。

绝大多数的电力变压器为油浸式。

(4) 按绕组数目分为：

1) 双绕组变压器。每相有高压、低压两个绕组。
2) 三绕组变压器。每相有高、中、低压三个绕组。
3) 自耦变压器。高、低压共用一个绕组。

(5) 按调压方式分为有载调压变压器和无载调压变压器。

(6) 按中性点绝缘方式分为全绝缘（中性点绝缘水平与首端绝缘水平相同）变压器和半绝缘（中性点绝缘水平比首端绝缘水平低）变压器。

第四节 变压器的基本结构

变压器的铁芯和绕组构成了变压器的器身，是变压器结构的主体。此外，还有油箱、绝缘套管、分接开关和冷却装置等构件。

一、铁芯

铁芯的作用是构成磁路，增强磁场，支撑和固定绕组，它把一次侧电路的电能不能转化成磁能，又把该磁能转化成二次侧电路的电能不能，因此，铁芯是能量传递的媒介体。

1. 铁芯的构成

铁芯分为铁芯柱和铁轭两部分，套装绕组的垂直部分为铁芯柱，连接铁芯柱使磁路闭合的水平部分为铁轭。

为了减少变压器运行时铁芯中的涡流和磁滞损耗，变压器铁芯通常由厚度为 0.35mm 或 0.5mm 的两面或单面涂有绝缘漆的硅钢片叠积而成，硅钢片属磁阻小、导磁率较高的软磁材料。

2. 铁芯的结构型式

变压器铁芯的结构型式一般分为心式和壳式两种，心式结构的特点是铁轭靠着绕组的顶面和底面，但不包围绕组的侧面。壳式结构的特点是铁轭不仅包围绕组的顶面和底面，而且还包围绕组的侧面。它们的结构示意图如图 1-2 和图 1-3 所示。

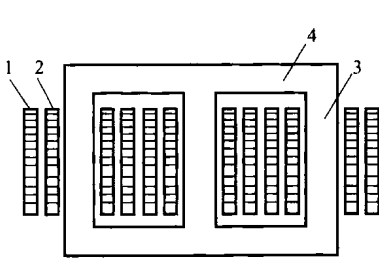


图 1-2 心式铁芯

1—高压绕组；2—低压绕组；
3—铁芯柱；4—铁轭

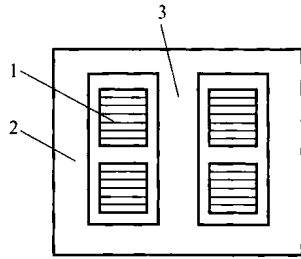


图 1-3 壳式铁芯

1—绕组；2—铁芯柱；3—铁轭

心式铁芯结构比较简单，有较多的空间装设绝缘，装配较容易，适合于容量大、电压高的变压器，电力变压器的铁芯大多采用心式结构。

壳式变压器的铁芯结构机械强度好，铁芯容易散热，但制造工艺复杂，铁芯用材较多，通常在小型干式变压器及某些特种变压器中采用这种铁芯结构。

大容量的三相变压器由于受运输条件的限制，需要降低铁芯高度，因而将普通三相心式变压器的上、下铁轭的一部分移到两个边柱的外侧，这就是三相五柱旁轭式变压器，其结构如图 1-4 所示，中间为三个心柱，各自为一相，两边旁轭和上、下端轭截面为心柱截面的 $1/\sqrt{3}$ 。另外还有单相单柱旁轭式铁芯，它实际上是垂直放置的单相壳式变压器。

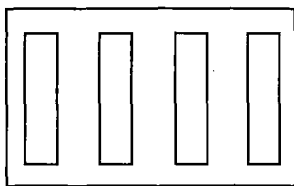


图 1-4 三相旁轭式铁芯

3. 铁芯的装配方式

硅钢片分热轧和冷轧两种，热轧硅钢片的导磁方向性不明显，叠积铁芯可采用直接缝，如图 1-5 所示。

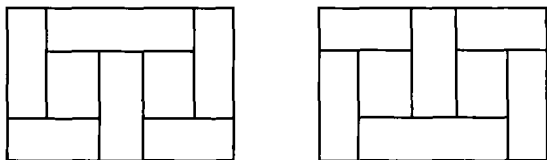


图 1-5 三相直接缝铁芯叠片叠积图

冷轧硅钢片的导磁性能比热轧硅钢片好，且损耗较低，但通常具有非常明显的导磁方向性，顺着轧辗方向导磁性能最好，垂直轧辗方向导磁性能较差，这两种情况下单位损耗也相差较大。为避免铁芯磁路转向时垂直于硅钢片的轧辗方向，用冷轧硅钢片叠积铁芯时，宜采用 45° 的斜接缝，如图 1-6 所示。

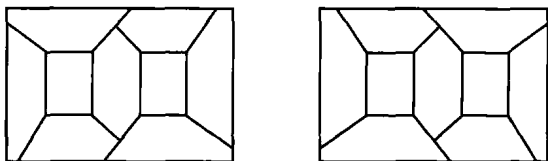


图 1-6 三相斜接缝铁芯叠片叠积图

小型变压器铁芯柱的截面是方形，在容量较大的变压器中，为了充分利用绕组内圆空间，常采用多级梯形，如图 1-7 所示。梯形的级数越多，铁芯柱截面越接近于圆形，在一定的线圈圆周直径下铁芯柱的有效截面积则越大。不过，随着级数增多，叠片种类随之增多，铁芯的制造工艺也更加复杂。

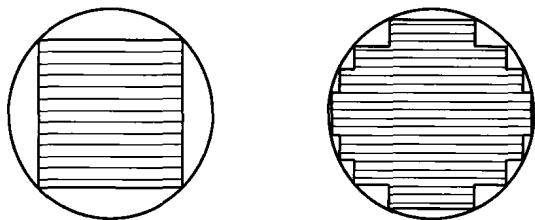


图 1-7 铁芯柱截面

铁轭的截面有矩形、T形等，如图 1-8 所示。

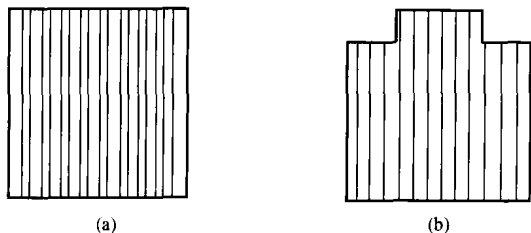


图 1-8 铁轭截面

(a) 矩形；(b) T形

在大型变压器中，为了改善铁芯的冷却条件，在铁芯中要设置油道。

铁芯占有的空间截面积叫做几何截面积，几何截面积减去硅钢片片间的间隙及绝缘漆膜厚度所占去的截面积，方为铁芯的实际有效截面积。有效截面积与几何截面积之比叫做叠片系数，它与硅钢片的平整程度、硅钢片的厚度和其绝缘厚度等有关，一般在 0.92~0.95 之间。

4. 铁芯的夹紧装置

变压器的铁芯必须夹紧，否则运行时铁芯会发出不正常的噪声，且当器身起吊时，可能会出现明显的残余变形。铁芯柱采用穿心螺杆夹紧时，铁芯柱必须冲孔，这会导致铁芯截面减小，冲孔处磁通转弯，使铁芯损耗和空载电流增大，为克服这些不足，20 世纪 80 年代后生产的中、大型变压器，一般采用环氧玻璃粘带绑扎。

在一些中、大型变压器中，铁芯柱采用无孔绑扎时，上、下铁轭仍采用穿心螺杆夹紧。近些年来，一些大型变压器在采用铁芯柱无孔绑扎的同时，铁轭采用无孔拉带结构。

5. 铁芯的绝缘

铁芯的绝缘有两种，即铁芯硅钢片间的绝缘以及铁芯硅钢片与结构件之间的绝缘。

铁芯片间的绝缘是把铁芯柱和铁轭的截面分成许多细条形的小截面，使磁通在垂直通过这些小截面时，感应出的涡流很小，从而限制涡流损耗。如果相邻两硅钢片之间无绝缘，截面厚度增加 1 倍，其损耗相对于有绝缘的两片硅钢片将增大为约 4 倍。

铁芯片间绝缘过小时，片间电导率增大，穿过片间绝缘的泄漏电流增大，将导致附加损耗增加。铁芯片间绝缘过大时，整个铁芯就不能认为是等电位，为避免出现片间放电现象，就必须将各片均连接起来接地，这就带来了不方便，所以，片间绝缘既不宜过小，也不宜过大，一般情况下应为 $60\sim 105\Omega/\text{cm}^2$ 。

铁芯硅钢片与其夹紧结构件的绝缘是防止硅钢片与结构件短接。虽然铁芯硅钢片间是不允许短路的，但是如果结构件形成的短路回路顺着磁通方向而不交链磁通，或者交链的磁通很小，则

对变压器产生的影响很微小。

6. 铁芯的接地

变压器在运行或试验时，会由于静电感应而在铁芯及其金属结构件上产生悬浮电位，造成对地放电。放电一方面使油分解，影响绝缘质量；另一方面又不能确定变压器在运行和试验中的状态是否正常，为了防止这种情况出现，铁芯及其结构件必须经油箱可靠接地。由于铁芯片间电阻较小，一片叠片接地即可认为所有叠片均接地，对于铁芯和铁轭的穿心螺杆，则由于电容的耦合作用，认为它们与铁芯的电位一样，不需接地。

铁芯只允许一点接地，如果有两点或两点以上接地，则接地点之间可能形成闭合回路，当交变磁通穿过闭合回路时，就会在其中产生循环电流，铁芯可能出现局部过热，接地片可能烧坏而产生放电，对变压器安全运行不利，所以，铁芯必须一点接地。

所谓铁芯一点接地，是指导磁体而言，其夹紧件不受此限，铁芯片与夹紧件要绝缘的另一个原因，就是确保铁芯一点接地。

二、绕组

绕组的作用是构成电路，流过电流，建立磁场，感应电势，变换电压。它基本决定了变压器的容量、电压、电流和使用条件，是变压器中最重要的部件。

1. 绕组结构型式

按照高、低压绕组在铁芯柱上的安排方式，变压器的线圈可分为同心式和交叠式两种类型。

同心式的高、低压绕组彼此同心地套在铁芯柱上，为便于绝缘，一般将低压绕组布置在里面靠近铁芯柱的位置，高压绕组在外面。高压和低压绕组之间、低压绕组与铁芯柱之间都留有一定的绝缘间隙，并以绝缘纸筒隔开。

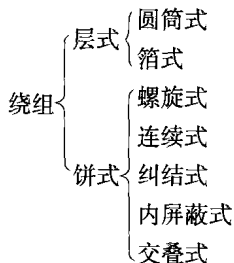
同心式绕组又可分为圆筒式、螺旋式、连续式和纠结式等几种基本型式。

同心式绕组结构简单、制造方便，应用广泛，国产电力变压器均采用这种结构。

交叠式绕组通常做成饼状，高、低压绕组沿铁芯柱高度方向交替布置，一般在靠近铁轭处布置低压绕组。交叠式绕组高、低压绕组之间间隙较多，绝缘比较复杂，主要用在壳式变压器中。

同心式绕组应用很广，本书主要介绍这种绕组。

根据绕组的结构和工艺特点，绕组大致可分为层式和饼式两种。绕组的线匝沿轴向按层依次排列的称为层式绕组；绕组的线匝在辐向形成线饼（线段）后，再沿轴向排列的称为饼式绕组。



变压器绕组型式分类

见图 1-9。

图 1-9 变压器绕组型式分类

国产电力变压器中常用的绕组有：

(1) 圆筒式绕组。这种绕组绕制时每个线匝彼此紧靠，成螺旋形沿绕组高度轴向排列，形状像一个圆筒。圆筒式绕组可以用单根导线绕制，也可用多根扁导线并联绕制。圆筒式绕组可以绕成单层、双层或多层，但层间必须垫绝缘纸或设置油道，绝缘纸和油道的规格主要取决于层间电压大小和绕组散热情况。

圆筒式绕组的优点是绕制简单、油道散热效率高，但是端部支撑的稳定性差，绕组的轴向高度难控制，绕组内部有时温差较大，并绕根数较多或绝缘件较复杂时绕制较困难。

圆筒式绕组主要用于中小型变压器，也可用于大型变压器的调压绕组。

(2) 螺旋式绕组。螺旋式绕组由多根导线并联按螺旋形绕制而成。当全部并绕扁导线重叠组成一个线饼，每绕一匝前进一个线饼时，称单螺旋；当全部并绕扁导线组成两个重叠线饼，每绕一匝前进两个线饼时，称双螺旋；依此推之，还有三螺旋、四螺旋等。

螺旋式绕组具有绕制简便的优点，但在应用上有局限性，如绕组匝数较多使轴向高度过大时不能采用。螺旋式绕组适用于低电压、大电流的结构，大型变压器的中、低压绕组多用螺旋式绕组，有载调压变压器的调压绕组也可采用螺旋式绕组。

(3) 连续式绕组。连续式绕组由扁导线连续绕制的线饼（又称线段）组成，每个线饼又由几个线匝按顺序连续绕成，线饼之间由绝缘纸做成的垫块形成油道，由于线饼之间没有焊头而是用一种特殊工艺方法绕制的，所以叫作连续式绕组。

连续式绕组的优点是机械强度高、散热性能好，但其耐冲击电压特性较差。

(4) 纠结式绕组。纠结式绕组是一种特殊的连续式绕组，其相邻的两线匝在电气上不是直接串联，而是间隔几个线匝后再相串联，这种结构提高了匝间电位差，增大了匝间电容（即纵向电容），可以改善冲击电压起始分布，所以纠结式绕组主要用于高电压绕组。纠结式绕组的最大特点是焊接点多，加工费时。通常对 110kV 级绕组采用纠结连续式，即绕组首端采用纠结式，末端采用连续式，220kV 及以上的大型变压器则采用全纠结式。

(5) 内屏蔽式绕组。内屏蔽式绕组是在连续式线段内部插入增加纵向电容的屏蔽线而构成的，故又称为插入电容式绕组。其外观极似纠结式，每段可插入屏蔽线的匝数可视需要自由改变，屏蔽线上无工作电流，因此通常采用截面很小、厚度很薄的导线，因为有工作电流的导线为连续绕成，所以它与纠结式相比可减少大量焊头。而且，插入屏蔽线的匝数可以自由调节，从而可按需要调节纵向电容。为了提高内屏蔽式绕组的空间利用系数，通常导线的匝绝缘较薄而屏蔽线的匝绝缘较厚。内屏蔽式绕组可用于 110kV 级及以上的高电压绕组。

2. 绕组材料

绕组一般是用纱（纸）包的绝缘扁（圆）铜（铝）线绕制