

电气絕緣設計

(下 册)

电气絕緣及电纜技术教研室
刘 其 昶 編

西安交通大學

1964. 9

电气絕緣設計

— (下 册)

編輯者：刘 其 昶

发行者：西安交通大学教材供应科

印刷者：西安交通大学印刷厂

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{25}$ 印張 $6 \frac{19}{25}$

1964年9月第1版 印数1—390

书号：44235 定价：¥1.50

序

本书是根据本人几年来在本校电气絕緣与电纜技术专业絕緣專門組講述“电气絕緣設計”这一課程的讲义編写而成。本課程的目的和任务是通过若干典型的电气絕緣結構的分析来闡明絕緣設計的基本原理。本书亦即按这样一个目的和任务来編写。本书主要只講某些电力設備方面的絕緣設計。

本书分上下兩冊。上册包括：若干基本电場的計算，电力电容器，高压套管，高压絕緣子等四章，下册包括：变压器絕緣，电机絕緣等兩章。

为便于学生学习中循序漸进和培养独立工作能力，上册較側重于絕緣結構設計的基本原理的闡述，下册則較側重于进一步联系生产实际以及发展方向。为此，下册有較多的篇幅討論某些特殊問題，例如絕緣結構应用新型材料以及絕緣結構在試驗研究方面的发展。

书中有許多只是个人一管之見，其中不免有欠妥或錯誤之处，謹希讀者指正。

下册編写之时，承上海交通大学張和康同志提供所編“电气絕緣設計”讲义作为参考。此外，并承本校黃华庭同志提供很多寶貴意見。本书付印时，承本校任佩余同志协助校对手稿，付出繁重的劳动。均此表示感謝。

刘其昶 于西安交通大学

1964年9月。

电气絕緣設計下冊目錄

序

第五章 变压器絕緣

§ 5—1	概論	1
§ 5—2	变压器絕緣的設計要求	5
§ 5—3	油浸式变压器所用的几种主要絕緣材料	7
§ 5—4	变压器絕緣結構分类	9
§ 5—5	变压器油的击穿	12
§ 5—6	油間隙中使用固体絕緣的作用	22
§ 5—7	变压器油中沿固体介质的表面放电	28
§ 5—8	变压器絕緣的冲击系数	33
§ 5—9	变压器主絕緣設計的原則	36
§ 5—10	35仟伏以下电力变压器的主絕緣設計	36
§ 5—11	变压器繞組間的絕緣	39
§ 5—12	繞組边缘电場的絕緣强度	45
§ 5—13	綫圈端部絕緣的制訂	47
§ 5—14	电力变压器主絕緣結構的比較	50
§ 5—15	引綫絕緣和套管下端和接地零件的絕緣	56
§ 5—16	当无限长矩形波投射到变压器繞組中时的波过程	60
§ 5—17	非周期性的和周期性的衰減波投射到变压器上的 情况	70
§ 5—18	改善瞬变过程中繞組电压分布的方法	77
§ 5—19	变压器繞組縱絕緣的选定	83
§ 5—20	变压器絕緣結構的初步計算	87
§ 5—21	变压器的絕緣处理簡述	93

§ 5—22	变压器絕緣的試驗	95
§ 5—23	变压器的模拟試驗理論	104
§ 5—24	变压器的电解槽模拟	112
§ 5—25	变压器絕緣的热性問題	113

第六章 电机絕緣

§ 6—1	概論	117
§ 6—2	电机的槽滿率	122
§ 6—3	电机絕緣的工作条件	126
§ 6—4	絕緣漆	130
§ 6—5	电磁綫	139
§ 6—6	电机絕緣中的塑料薄膜	150
§ 6—7	低压电机繞組的絕緣結構	159
§ 6—8	电机絕緣的干燥和浸漬	161
§ 6—9	对于高压电机絕緣的要求	173
§ 6—10	高压电机絕緣材料	176
§ 6—11	高压电机繞組的絕緣結構	177
§ 6—12	电机繞組匝間絕緣的選擇	183
§ 6—13	浸胶連續式絕緣工艺簡述	186
§ 6—14	汽輪发电机轉子繞組的絕緣	193
§ 6—15	換向器的絕緣	198
§ 6—16	定子繞組主絕緣的耐电强度和絕緣厚度	199
§ 6—17	高压电机定子繞組的电暈及其消除方法	203
§ 6—18	高压电机定子繞組出槽处半导体复盖层的計算	209
§ 6—19	30千伏以上的汽輪发电机定子繞組的絕緣	218
§ 6—20	电机絕緣的热老化和耐热等級的評定方法	222
§ 6—21	高压电机定子繞組击穿的計算	237
§ 6—22	大型电机定子繞組絕緣材料的发展	240
§ 6—23	新型合成树脂絕緣胶在高压电机中的应用	246
§ 6—24	电机絕緣的电气性能和試驗	255
§ 6—25	电机絕緣的預防性試驗	269

附录六	电力变压器、电器和絕緣子的試驗电压，根据 电工专业标准草案电 (D) 33-59	282
附录七	有关变压器結構和試驗的若干参考图和数据	285
附录八	有关电机結構的若干参考图	296
附录九	有关电机絕緣的若干参考資料	299
附录十	苏联工厂所采用交流电机主絕緣結構	305
附录十一	有关絕緣結構高压試驗的若干参考图和表	313
附录十二	有关絕緣結構游离和局部放电測試的若干参考图	327

第五章 变压器絕緣

§ 5-1 概 論

一、变压器分类

变压器是电力系統中用得最广泛而又最昂貴和最关键設備之一。每一KV A的发电量約須配备5-8KV A的变压器。变压器就用途而言，基本类型有：

(1) 电力变压器——在电力系統的輸电綫路和配电网中的升压和降压用的电力变压器，有各种电压級，容量自数十至数十万仟伏安，

(2) 自耦变压器——其原副繞組合为一个繞組，在比較小範圍內改变电压之用，或用在交流电动机的启动器中等，

(3) 感应調压器——高压繞組上有分綫接头，可以在空载下或負载下調节电压，

(4) 专用变压器——如高压試驗变压器、电炉变压器、电焊变压器、水銀整流器用变压器、矿山用变压器、医疗設備用变压器等。

本章主要讲述单相和三相的双繞組电力变压器的絕緣問題。就运行而言，电力变压器的运行是否可靠严重地决定电网的安全送电，而变压器的絕緣質量却又是对变压器的运行可靠与否起着决定性作用。就制造而言，110和220仟伏高压变压器的絕緣材料的价格約占成本的18-25%，更重要的却还不在于絕緣本身很貴，而是絕緣結構影响变压器的总尺寸、重量和成本，并且还影响其他作用——例如絕緣的存在影响鉄芯和繞組的散热以及增加电抗，又由于絕緣的存在，变压器的銅和鉄的用量就增多。因此，大型高压变压器的减小尺寸和重量，降低成本，改进运行特性等問題常可以因改进絕緣設計而获得。当現代380-500仟伏輸电綫路出現以后，近年来并繼續向更高电压735仟伏輸电发展的情况下，电力变压器的絕緣設計更具有重大意义。

变压器按照鉄芯和繞組的相对位置来分类，則可分为“鉄芯式”和

“铁壳式”两种，(图5-1)。如绕组包在铁芯外围则称为铁芯式变压器，如铁芯包在绕组外围则称为铁壳式变压器。由于铁芯式变压器结构和安装比较简单，在世界大多数国家中，电力变压器常采取铁芯式。电力变压器通常采取三相式，但巨型变压器则亦常采取单相式。

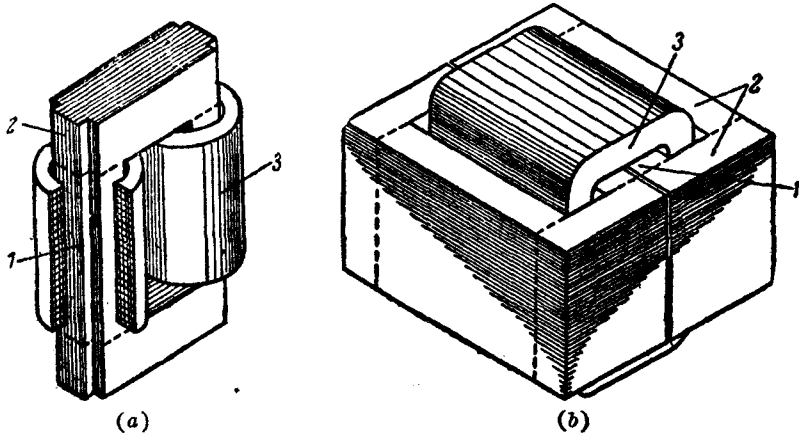


图5-1 单相铁芯式和铁壳式变压器示意图，(a)铁芯式；(b)铁壳式
1—铁芯柱； 2—铁轭； 3—绕组

二、铁芯式变压器和其绕组

这种变压器包括四个主要部分：铁芯、绕组、套管和油箱(图5-2)。这种变压器典型布置如图5-3。铁芯由0.35或0.5毫米的矽钢

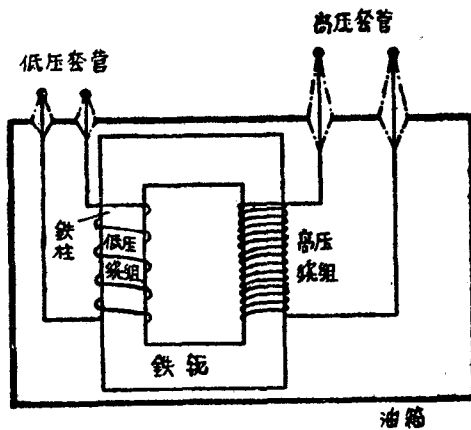


图5-2 变压器的主要部分

片疊成，片與片之間亦有很薄的絕緣層（如棉、氧化膜、油漆、釉等）以減小渦流損耗。

變壓器繞組按高低壓繞組相互位置的不同可分為二種基本型式：同心式繞組和交疊式繞組。

(1) 同心式繞組 —— 如圖 5-3 所示，通常把低壓繞組放在靠近鐵芯處，這對絕緣結構來看比較有利。繞組均固定在絕緣筒上。同心式繞組適用於鐵芯式變壓器。在高压電力變壓器中，同心繞組主要分為餅式繞組和多层圓筒式繞組兩種。圖 5-4 所示為這二種繞組的典型布置和接綫的示意圖。

(2) 交疊式繞組 —— 如圖 5-5 所示，高压與低壓繞組均為餅式繞組依次交替相疊，而靠近

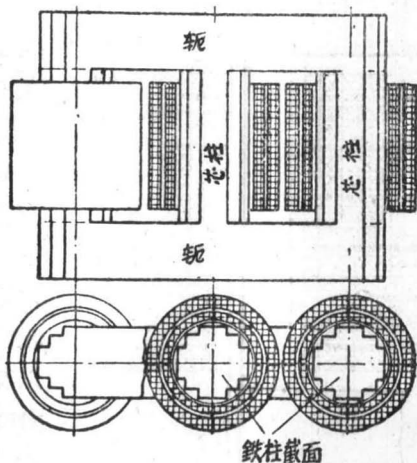


圖 5-3 具有同心式繞組的三相鐵芯式變壓器

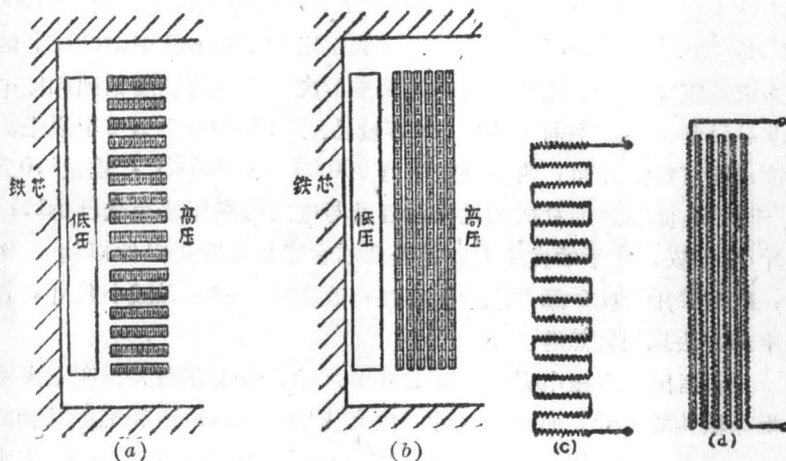


圖 5-4 餅式和層式繞組布置和接綫示意圖

(a) 餅式繞組 (b) 多层圓筒式繞組 (c) 餅式繞組接綫示意圖 (d) 筒式繞組接綫示意圖

磁軛的兩端都是低壓繞組，這種繞組可以用於鐵芯式或鐵殼式變壓器，但主要用於鐵殼式變壓器和電壓低而電流特別大的變壓器，如電爐變壓器。

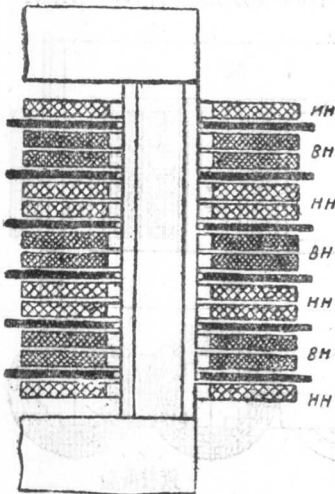


圖 5-5 交疊式繞組

電力變壓器採用鐵芯式和同心繞組是目前最主要的形式；而高壓電力變壓器則又大都採取連續式和餅式同心繞組。在歐洲有些國家如德、捷克等則有時也採用圓筒式繞組，圓筒式（層式）繞組有其獨到之優點，這點下面還要談到，但結構和工藝比較複雜以及機械性能不及餅式繞組好。在我們，高壓電力變壓器只採取鐵芯式以及連續式和餅式繞組，另一方面，對圓筒式繞組也進行了若干研究工作。

三、變壓器結構的發展

目前變壓器是向超高壓和大容量方向發展。我國在解放前製造最大的單台容量為 $60,000\text{KV}\cdot\text{A}$ ，電壓 33KV ，而現在已生產出 $120,000\text{KV}\cdot\text{A}$ ， 220KV 的大型變壓器，以及試製出 $60,000\text{KV}\cdot\text{A}$ ， 330KV 的巨型超高壓變壓器。此外，我國還逐步形成了本國的標準系列和技術標準。目前世界水平則 400KV 者容量已達 $240,000\text{KV}\cdot\text{A}$ 甚至以上。在技術經濟指標方面，西德有變壓器 $200\text{MV}\cdot\text{A}$ ， 245KV ，重量 1.0 公斤/千伏安，而我國則曾試製過相近容量與電壓的變壓器重量已達 1.17 公斤/千伏安。今后的發展方向是提高單台容量和改進組件結構。例如，磁路採用冷軋矽鋼片以降低鐵耗，改進絕緣結構以減小尺寸，改進冷卻方法以利散熱等。

必須指出，高壓電力變壓器的外形尺寸和重量在很大程度上決定於絕緣結構的尺寸，而這些尺寸是由變壓器的試驗電壓和絕緣結構的耐電強度而確定。因此，改進的方法一方面是降低變壓器的絕緣水平和相應的試驗電壓，而另一方面是改進絕緣結構的電氣強度，例如採取油浸絕緣以代替目前常用的油屏障絕緣，採取圓筒式繞組以代

替餅式繞組等。這些均能使絕緣更為緊湊，都是須要進一步研究的方向。當然，在大容量的變壓器中，發熱問題又可能更為突出，則此時又當以降低損耗，加強冷卻和提高絕緣材料的耐熱性等方面作為研究方向。

§ 5-2 變壓器絕緣的設計要求

變壓器絕緣的工作條件是處於額定電壓和電流下要求能長時期工作，其使用年限不低於 20~25 年。在運行中，變壓器絕緣面對的問題主要也不外乎電、機械、熱這三個方面。當然，此外也有化學作用等問題，例如變壓器油與銅、鐵接觸在高溫下即會加速老化，變壓器油對繞圈中的浸漬漆和其他固體絕緣材料也有相互作用等。

一、電性方面的要求

世界各國對電力變壓器的絕緣水平各有其規定，這也就是對變壓器絕緣在電性方面的最基本的要求。我國電工專業標準 D33-59 對變壓器的試驗電壓值規定如表 5-1。但是近年來，由於不斷研究降低絕緣水平，表 5-1 所列試驗電壓值仍有下降趨勢。

在全波沖擊試驗中，沖擊波除峯值 U_0 外，波形也有很大關係。其中波頭 τ_1 主要影響繞匝間和繞餅間的絕緣，波頭愈陡則愈為嚴重，波長（即半值時間） τ_2 愈長則對地絕緣所受電壓就增高。因此，全波可以用 U_0 、 τ_1 、 τ_2 三個數值來表示。目前世界各國所採用的沖擊波形是 1.5/40 微秒，少數國家如美國則採取 1/50 微秒波形。事實上由於所發生的沖擊波形總有一定的容差，因此這二種不同沖擊波下的試驗結果仍認為是可以互相比較的。截波試驗對於匝間絕緣比之全波試驗更為嚴重，是考驗匝間絕緣的重要方法。

一分鐘工頻耐壓試驗主要是考驗變壓器高壓繞組對低壓繞組和高壓繞組對地的絕緣強度。而沖擊試驗則主要是考驗繞圈匝間和層間的絕緣強度。由於沖擊試驗比較複雜，所以一般只在型式試驗中進行。在平時例行試驗中，常用感應的二倍額定電壓（100 赫，一分鐘）來進行試驗。關於變壓器試驗問題，本章後面還要談到。

變壓器絕緣的設計主要是根據工頻一分鐘耐壓試驗電壓值以及全波和截波沖擊試驗電壓值而進行。其中全波沖擊試驗電壓值常稱為變

压器的基本冲击水平(BIL)。

表 5-1 电工专业标准 D33-59 所规定的变压器的试验电压

额定电压 千伏有效值	最大工作 电压 千伏有效值	一分钟工频 试验电压 千伏有效值	1.5/40微秒全波 冲击试验电压 千伏最大值	2 微秒截波冲 击试验电压 千伏最大值
3	3.5	16	42	50
6	6.9	22	57	70
10	11.5	28	75	90
(15)	17.5	38	100	120
(20)	23.0	50	120	150
35	40.5	80	180	215
(60)	69	140	300	360
110	126	200	425	530
(154)	177	275	585	730
220	252	400	835	1050
330	363	520	1200	1440
*500	525	700	1700	2040

註：其中 500 千伏电压级仅供研究用。

二、机械方面的要求

变压器绝缘结构机械方面的要求包括制造过程及运行过程中的要求。在运行过程中主要应考虑短路电流的电动力。短路电流可达额定电流的 25~50 倍。这在短路的一瞬时，线圈上所受到的电动力可达平时的千倍，有时每米长度的导线所受的力可达一吨，如绝缘结构强度不足则将完全被拉开或破坏。在正常运行时，高低压绕组间有幅向的斥力和使内外线圈分别受到压缩及拉伸的力。如果高低压绕组的高度不等，则还受到互相推开的轴向力。实际上即使设计得两绕组高度相等，由于两端的线圈所受的力不平衡，仍有此轴向力，而由于装配不可能使绕组高度完全一样则又增加了轴向的斥力。图 5-6 所示为各种机械力的示意图，这些力都需要用绝缘结构和垫块来加以支持。一般而

言，軸向固定比輻向固定來得困難，特別是在圓筒式繞組中。

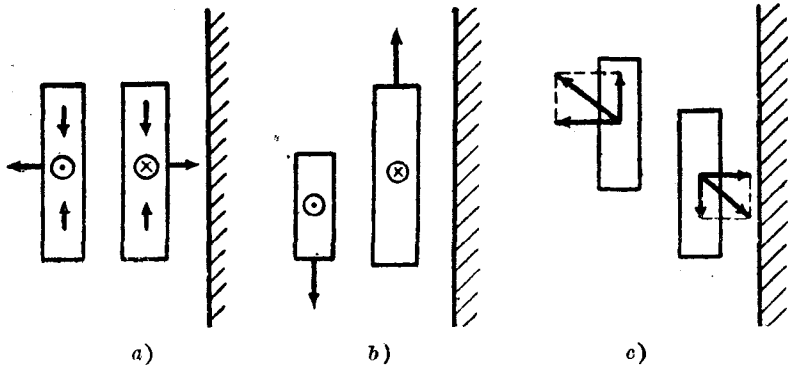


图 5-6 变压器繞組間的电动力示意图

a) 輻向力和壓縮力；b) 軸向斥力；c) 裝配不等齊時的輻向力和軸向力。

三、热的方面的要求

一般电力变压器中最主要的絕緣材料是变压器油和帶以及翻蓋筒等，均属于 A 級絕緣，所以最高允許溫度为 105°C 左右。油浸变压器由于油的循环作用，散热比較良好，在設計各处油槽时，应考虑油的流动而不宜太窄，不能只从电性的角度来考虑。

干式变压器可以做成 B 級或 H 級絕緣，最高允許溫度可以提高。但是，由于散热困难，而且空气的耐电强度很低，所以干式变压器在高压和大功率方面是不經濟的，只有在特別的場合，如矿井下应用，則有不燃燒等优点。

§ 5-3 油浸式变压器所用的几种主要絕緣材料

变压器中所用的絕緣材料应该滿足前述变压器絕緣在运行中所提出的一些要求和技术条件的規定。因此，它們应具有足够的电性、耐热性、机械性以及其它化学性如耐油性等等。此外，这些材料更要求成本較廉，来源較多以及制造工艺簡便。目前油浸式变压器中广泛应用下面的几种絕緣材料。

(一) 变压器油——这是最基本絕緣材料之一，充滿着整个变压器油箱，而兼有絕緣和散热两种重要作用。它的耐电强度很好，傳热性能比空气好得多而热容量也比空气大得多。因此，在电压 6 千伏、功

率 20 千伏安以上的变压器几乎均采用充油式。

苏联 ГOCT 982-53 规定变压器油技术条件如下:

比重不大于	0.895
50°C 时恩氏粘度不大于	1.8
20°C 时恩氏粘度不大于	5.0
闪点不大于	135°C
凝固点不高于	-35°C
机械杂质	无
悬浮炭质	无
灰分%不大于	0.005
硫	无
有机酸含量(酸价, 以毫克KOH/克油计)不大于	0.05

稳定性:

- (1) 在人工老化后有机酸含量(毫克KOH/克油计)不大于 0.35
- (2) 在人工老化后沉淀物含量以%计不大于 0.1

击穿电压(在标准放电器内):

- (1) 35千伏或以上的变压器中不低于 40
- (2) 6-20千伏的变压器中不低于 30
- (3) 低于6千伏的变压器中不低于 25

其他: 油应该是透明的, 不应含有水溶性的酸类和硷类。

(二) 电纜帛(ГOCT 645-41)——由未漂白的硫酸纖維制成, 作成不同寬度的 K-08、K-12 和 K-17 帛的卷筒。在变压器中常用的厚度为 0.12 毫米, 密度約为 0.7 克/厘米³。它用于导綫絕緣、繞組的层間絕緣与引綫絕緣, 也可用作綫匝間的加强絕緣、电容环的絕緣、屏蔽面的絕緣等。某些高压变压器也有以油帛絕緣作为主絕緣。

(三) 电话帛(ГOCT 3553-47)——系质地同电纜帛但較薄的帛, 一般厚 0.05 毫米, 密度 0.82 克/厘米³, 制成寬 500 毫米卷筒。这种帛用作导綫絕緣、层間絕緣、出綫端和分綫头的絕緣。

(四) 电工帛板(ГOCT 2824-45 和 ГOCT 4194-48)——由未加着色剂、填充剂和胶粘物的硫酸纖維制成, 作为綫圈間的垫片、板条、繞組間的支撑絕緣、隔板、垫圈和繞組間的圓筒等。它在高压变

压器中用途很广泛。厚度 0.1 至 0.5 毫米的薄片制成卷筒，厚度 1 至 3 毫米者为片状。它的密度约为 1.0 克/厘米³，具有很大的吸湿性，如受潮后则很快失去电性。电工纸板浸油后 $\epsilon \approx 4$ ， $E_{np} = 17 - 35$ 千伏/毫米。

(五) 漆布——用棉布或绸浸以耐油漆或瀝青漆制成，然后卷成卷状。漆布用以加强特别危险处的绝缘，如要求有一定机械强度和折叠处的绝缘，在绕组附近的绝缘等。它的 $E_{np} \approx 30$ 千伏/毫米，在相对湿度 65% 时 $\rho_v \approx 10^{11}$ 欧-厘米。

(六) 木材（白山毛榉）——在电压级不很高的变压器中作为板条和垫块。

(七) 斜纹布带和绸带——用作绕组匝和出线头绝缘等处的机械固定，也用以包扎屏蔽匝、电容环等零件。

(八) 绝缘漆——根据用途分为浸渍用漆、涂刷用漆和胶合用漆。绕组浸渍绝缘漆并固化后可以提高耐热性和耐油性，同时也可以提高机械强度和耐电强度。通常采用为醇酸树脂漆。在干式变压器中则也可用油性瀝青漆或耐热漆涂刷。

(九) 胶布——由涂有酚醛漆的布在热状态下加以很大压力而成。胶布板由于吸湿性而常在潮湿下分层或变形，使绝缘性能大为下降。

胶布制成筒状常称胶木筒可作绕组间绝缘、绕组对铁芯绝缘以及引线绝缘。胶布制成板状品（胶布板）则可作为接头板、分线开关板等。

(十) 玻璃丝和石棉绝缘——作为电磁绕组绝缘。因为未浸渍的棉纱在热的变压器油中会很快失去机械强度，如浸以酚醛漆，则又易为脆性，所以在变压器中不采用棉纱作导线绝缘。

(十一) 电瓷——用作出线头绝缘套管以及固定引线的部件。

(十二) 其他绝缘材料——例如合成液体介质如苏伏油、苏伏多油在某些条件下可代替变压器油，六氟化硫在干式变压器中代替空气以提高散热和绝缘强度。这些材料尚未广泛应用。

§ 5-4 变压器绝缘结构分类

变压器绝缘可以分为内绝缘和外绝缘。图 5-7 所示为油浸式变压器的绝缘分类。图 5-8 所示为饼式绕组绝缘的布置。

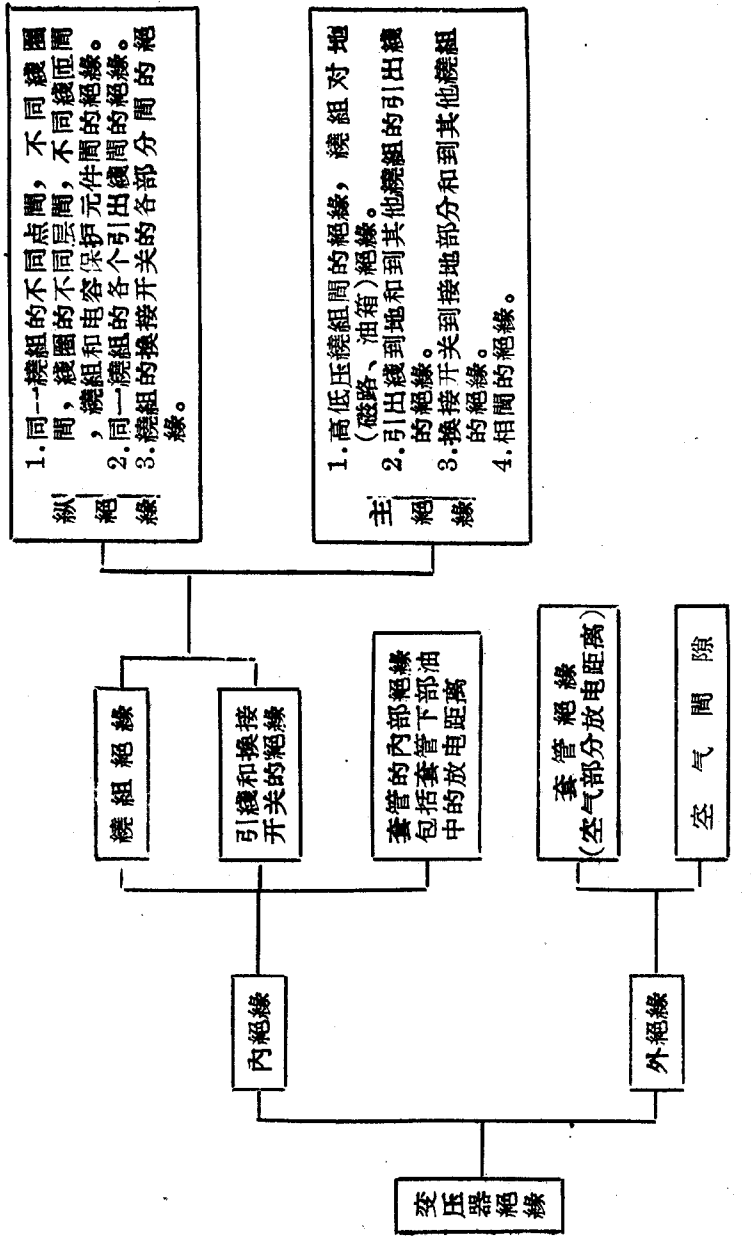


图 5-7 油浸式变压器的绝缘分类

內絕緣是处于油箱中的各部分絕緣。这种絕緣是油、固体材料和油的組合和浸于油中的固体材料。

外絕緣是空气絕緣，这是套管彼此間和对接地部分間的絕緣或保护間隙。

內絕緣又可分成主絕緣和縱絕緣两种。主絕緣是某一繞組与接地部分間及与其他繞組間的絕緣。一般是由一分鐘工頻試驗电压和冲击試驗电压决定的。

处于繞組之外，連接繞組各部分以及繞組与套管的那些連接綫本身的絕緣——称为引出綫絕緣。一般是根据工頻試驗电压来决定的。

同一繞組各部分間的絕緣称为縱絕緣，如匝間絕緣、层間絕緣等，設計是根据冲击强度而决定的。

决定絕緣結構的首先是变压器的电压級，但是变压器的功率也有重大影响。当功率增大时，繞組的尺寸，其内部各个元件間的距离，到其他繞組以及到接地部分的距离都增大了。这是由冷却、机械强度和結構上的理由所决定的，但是这样也改变了决定内部振盪的那些条件和改变了絕緣的条件。当額定电压在 35 千伏以下时，功率增大时的繞組結構的改变使得絕緣各元件的耐电强度裕度很大，因而絕緣的电

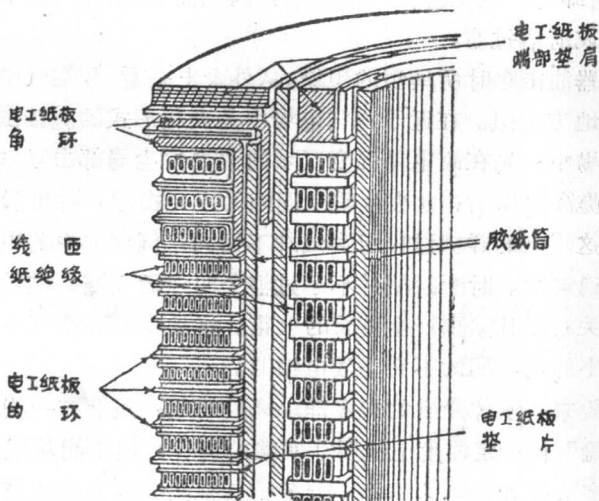


图 5-8 变压器餅式繞組絕緣布置