

看图学艺·专业篇

变 压 器 识 图

王尽余 潘妙琼 钟梅 编著



化 学 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

本书以图解的形式简明介绍了变压器的类型、基本工作原理、主要结构组成、安装及一些安全用电知识。全书以图解的形式配以简明的文字有针对性地说明具体的内容，避免了理论内容偏多、偏深的文字叙述。本书可作为维修工人自学用书，也可作为农民工培训用书，旨在使劳动者便于学习和借鉴，以便把有关知识更好地运用到实际生产中。

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器识图/王尽余，潘妙琼，钟梅编著. —北京：
化学工业出版社，2008.7

(看图学艺·专业篇)

ISBN 978-7-122-03137-2

I. 变… II. ①王… ②潘… ③钟… III. 变压器-图解
IV. TM4-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 091579 号

责任编辑：宋 薇 杜进祥

装帧设计：尹琳琳

责任校对：蒋 宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市前程装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张 7 字数 128 千字 2009 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：15.00 元

版权所有 违者必究

前　　言

随着我国经济建设高速发展，各种类型的变压器在工农业生产及人们的日常生活中有广泛的应用，为了保证其正常运转，变压器的保养和维修工作就显得非常重要。多了解一些变压器的有关知识对提高劳动者素质和操作技能有很大帮助。

劳动者技术级别不同，要求也不同，掌握相关基础知识、基本专业技术及解决技术问题能力，才能满足现代从业和就业的需求。

本书以图解的形式介绍了变压器的类型、基本工作原理、主要结构组成、安装及一些安全用电知识。全书以图解的形式配以简明的文字有针对性说明具体的内容，避免了理论内容偏多、偏深的文字叙述。本书可作为维修工人自学用书，也可作为农民工培训用书，旨在使劳动者便于学习和借鉴，以便把有关知识更好地运用到实际工作中。

本书由王尽余、潘妙琼、钟梅编著，在编写过程得到王湧的支持与参与，使本书臻于完善，在此深表谢意。

作者水平有限，若有疏漏和不当之处，敬请读者批评指正。

编者

2008年6月

目 录

第一章 变压器的用途和分类	1
1. 什么叫变压器	3
2. 变压器类产品在电力系统中的应用	3
3. 配电变压器	4
4. S11 型全密封配电变压器	5
5. R 型卷铁芯变压器	6
6. 立体卷铁芯变压器	6
7. 树脂浇注干式变压器	7
8. 敞开式干式变压器	7
9. WSG3 系列非封闭式干式变压器	9
10. 矿用变压器	9
11. KSG-2.5、4/0.66 矿用隔爆型干式变压器	9
12. 试验变压器	9
13. 组合式变压器	11
14. 变压器的主要技术参数	12
15. 变压器的铭牌举例	13
第二章 变压器的基本知识及工作原理	15
1. 交流电的基本概念	17
2. 初相角的波形图	17
3. 单相交流电路的纯电阻电路	18
4. 单相交流电路的纯电感电路	18
5. 电容器	19
6. 单相交流电路的纯电容电路	20
7. 三相交流电源的星形接法	21
8. 交流电源星形连接的相电压和线电压	21
9. 三相交流电源的三角形接法	21
10. 三相负载的星形连接	22
11. 三相负载的三角形连接	22
12. 互感现象	22

13. 变压器基本组成	23
14. 变压器改换电压的基本工作原理	24
15. 变压器的空载运行	24
16. 变压器的负载运行	25
17. 变压器 T型等值电路	26
18. 配电变压器的接线方法	26
19. 自耦变压器的原理	26
第三章 变压器的结构	29
1. 配电变压器结构	32
2. 变压器器身结构	33
3. 变压器铁芯基本类型	33
4. 芯式铁芯主要结构形式	34
5. 铁芯柱的各种截面形状	35
6. 铁芯的油道设置	35
7. 芯柱与铁轭的叠片形式	35
8. 小型单相变压器常用铁芯型式	36
9. 单相芯式变压器铁芯和绕组	36
10. 三相三芯柱变压器的铁芯和绕组	37
11. 三相五芯柱变压器的铁芯和绕组	37
12. 单相壳式变压器的铁芯和绕组	37
13. 三相壳式变压器的铁芯和绕组	38
14. 变压器铁芯的夹紧结构	38
15. 变压器铁芯接地方式	42
16. 变压器绕组	42
17. 交叠式绕组	44
18. 低压层式绕组出线头绝缘包扎	44
19. 连续式线圈出头包扎	45
20. 螺旋式线圈端部包扎图	45
21. 中型变压器的内部绝缘结构	46
22. 变压器套管	47
23. 有附加绝缘的瓷套管	48
24. 桶式油箱基本结构形式	49
25. S11 型变压器吊芯式油箱	49
26. 钟罩式油箱基本结构形式	50
27. 钟罩式油箱	51
28. 分接开关原理	52
29. 配电变压器无励磁分接开关	52
30. 三相中部调压无励磁开关	53

31. 管式冷却器	53
32. 波纹式油箱基本结构	55
33. 可拆型 (PC) 310 片式散热器结构	55
34. 带吹风的散热器	56
35. 防爆管	57
36. 压力释放阀	57
37. 储油柜	58
38. 隔膜式储油柜	59
39. 胶囊式储油柜	60
40. 指针式油位计	60
41. 吸湿器	61
42. 信号温度计	62
43. 气体继电器	63
44. 挡板式气体继电器	63
第四章 变压器的安装维护	65
1. 变压器绝缘电阻的测试	67
2. 兆欧表	67
3. 兆欧表的测量方法	68
4. 测量 Yd 接线三相变压器绕组的绝缘电阻	69
5. 用万用表测量变压器极性	69
6. 用电压降法进行变压器直流电阻的测量	70
7. 变压比的测定	71
8. 变压器的空载试验	71
9. 通过互感器接入仪表三相变压器的空载试验	72
10. 变压器负载试验和短路阻抗测量	73
11. 通过互感器接入仪表三相变压器的负载试验	73
12. 单相电源进行三相变压器短路试验	73
13. 三相电源进行三相变压器短路试验	74
14. 变压器的耐压试验	74
15. 用直接负载法进行变压器的温升试验	75
16. 铁芯多点接地故障具体位置的查找	75
17. 铁芯可能发生的故障及处理方法	76
18. 变压器吊铁芯	79
19. 钟罩式油箱的起吊	80
20. 气体继电器的安装	80
21. 净油器在变压器的连接	81
22. 瓷套管检查	81
23. 检查油位	82

24. 检查油温	82
25. 冷却装置检查	82
26. 中小型变压器不应受力处为何漏油？	83
27. 变压器油枕严密性试验	83
28. 密封胶垫的质量是变压器渗漏油的原因之一	84
29. 绕组内部油道及油流方向	85
30. 真空注油	85
31. 变压器油的真空喷雾处理	86
32. 变压器热油喷雾真空干燥	86
33. 热油喷淋真空干燥	87
34. 油箱铁损法干燥变压器	88
35. 废旧油处理	89
36. 强迫油流动渗滤法再生系统	89
37. 吸附渗滤法实例——运行变压器油带电再生原理流程	89
38. 变压器故障分析及检查	90
第五章 安全用电知识	93
1. 单相触电	94
2. 两相触电	95
3. 接地体附近的电位分布	95
4. 接触电压、跨步电压触电	96
5. 保护接地	96
6. 保护接零	97
7. 重复接地	98
8. 电流对人体的影响	98
9. 触电急救法——口对口人工呼吸法	99
10. 触电急救法——体外心脏挤压法	99
参考文献	101

第一章

变压器的用途和分类

变压器是一种静止的电气设备，在一定功率下，能升高、降低电压，变换电流大小。在日常生产、生活领域中广泛使用着各种变压器。变压器用途广泛，随着我国经济建设高速发展，各种类型的变压器在工农业生产及人们的日常生活中，被广泛用于工厂、矿山和城市建设，如地铁、污水处理等重大工程项目，还进入了港口、发电厂、大学城、商住楼中。

变压器在电力系统中更是不可缺少的设备。通常，人们所使用的电能主要是由发电厂的交流电机产生的，大型发电机的出口电压一般是 6.3kV。一般大、中容量发电机发出的电流电压，不仅不适合于一般用电，且要将大量电能输送到远方，采用较低的电压输送是不可能的。由于电压低，其输送的电流就很大，大电流在输送的线路上产生很大的功率损耗和电压降，也不能经济输送到较远的用电场所。采用较高的送电电压，才能使我们合适而又方便地把电力输送到适当的用电场所。把交流电的功率从发电厂输到用户，通常要用很长的输电线路。在输送功率 P 和功率因数 $\cos\phi$ 为定值的情况下，电压 U 越高，线路中的电流 I 越小，输电线的截面可取得越小，这样能够节约大量材料。反之，电能有可能大部分或全部消耗在输电线上。为了减少输电线路上的能量损失，提高输电效率，往往在输电之前，利用变压器把电压升高到所需的数值。变压器的安装容量为发电机安装容量的 6~8 倍。电能到用电区域后，又需要各种容量和电压的变压器进行电能分配，用电部门利用变压器再把高电压变换为适合现场实际负载所需的低电压的电压等级后，才能使用。如照明电压一般为 36V、48V、110V、220V，动力电压为 380V，系统电压等级为 10kV、35kV、60kV、110kV、220kV、330kV、500kV。

变压器用途广泛，品种、规格繁多。变压器的分类可按其使用情况、结构、绕组及相数等划分。变压器的分类见表 1-1。

表 1-1 变压器的分类

分类法	类 别	细 分 类 别
安装地点分	户内 户外	干式、环氧浇注式 油浸式、柱上式、平台式、一般户外
用途分	电力变压器	升压、降压、配电、联络变压器 厂用变压器、增压变压器(低压侧另接入一变压器以增加输出电压)
	特种变压器	电炉变压器、电焊变压器、仪用变压器、整流变压器等
相数分	单相 三相 多相(如整流变压器)	
绕组分	单相 三相 多绕组 自耦	

续表

分类法	类别	细 分 类 别
调压方式分	无励磁调压 有载调压	
冷却方式分	油浸自冷 油浸风冷 油浸水冷 强油循环 干式自冷 干式风冷	扁管散热或片式散热器 附冷却风扇 附油水冷却器 油泵 附风冷却器
导电体 材质分	铜导线 铝导线 半铜半铝	已发展铝箔或铜箔产品
铁芯型 式分	心式变压器 壳式变压器 卷铁芯变压器	
容量分	小型变压器 中型变压器 大型变压器 特大型变压器	容量在 $630\text{kV}\cdot\text{A}$ 及以下 容量为 $800\sim 6300\text{kV}\cdot\text{A}$ 电压在 110kV 及以下, 容量为 $8000\sim 63000\text{kV}\cdot\text{A}$ 电压在 220kV 及以上, 容量为 $3150\text{kV}\cdot\text{A}$ 及以上

对一个变压器的了解必须检查标注在变压器类产品上用来表示该产品在规定条件下运行特征的参数的数值, 变压器的铭牌是使用变压器的主要依据, 在接线前必须了解它的各项参数, 以便正确使用。

1. 什么叫变压器

变压器用途广泛, 在生产、生活各个领域中使用着各类变压器。图 1-1 是各类变压器外形示例。

2. 变压器类产品在电力系统中的应用

变压器用途广泛, 在生产、生活各个领域都可以看到。电力变压器是用途最广的变压器。电力系统中使用的变压器, 可分为升压、降压和配电变压器。对电力系统来说, 将大量电能输送到远方, 低电压传输功率损耗太大, 只能采用变压器将发电机的线电压提高再输电。到用电区域后需将各种容量和电压的变压器进行电能分配, 从而形成完整的电力系统。图 1-2 介绍了变压器在电力系统中的应用。

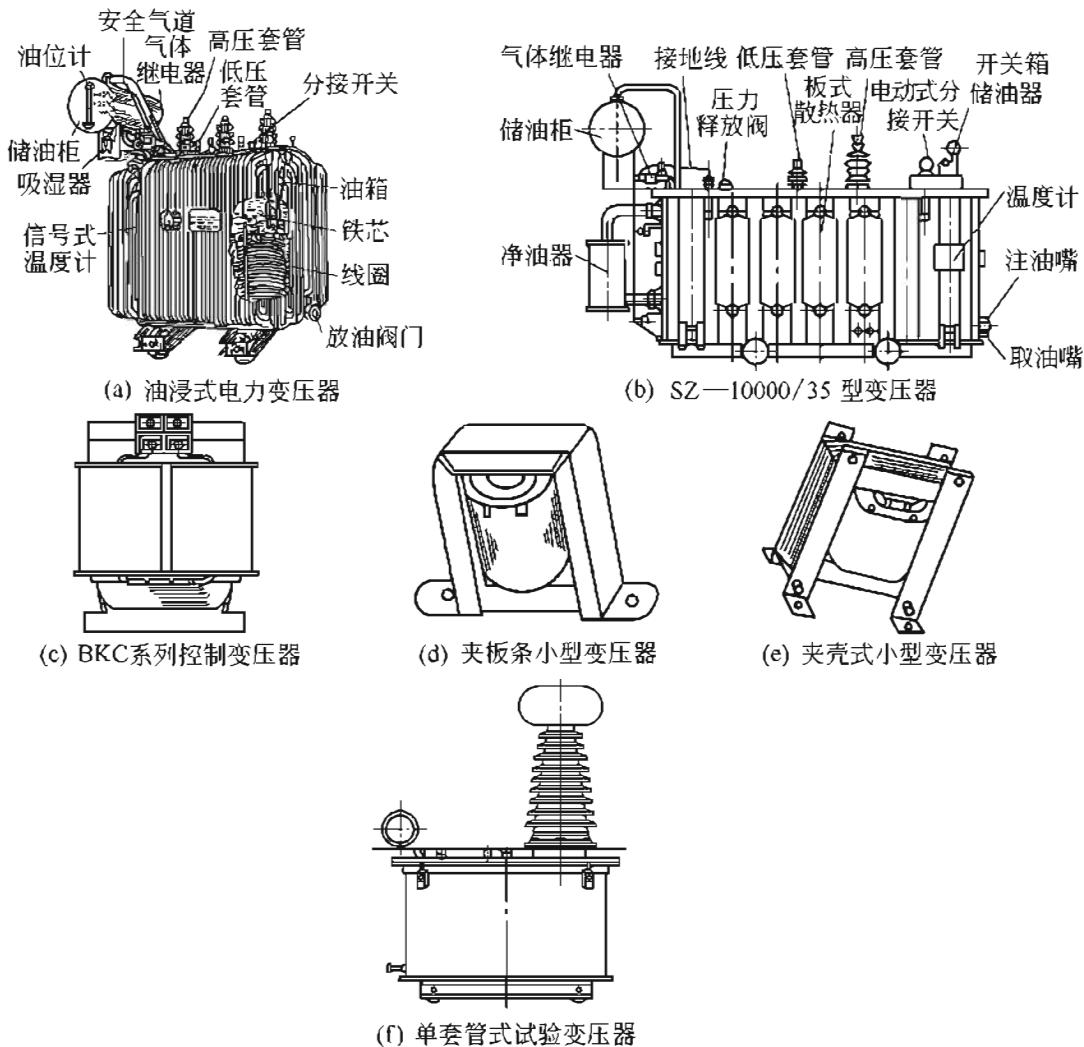


图 1-1 各类变压器举例

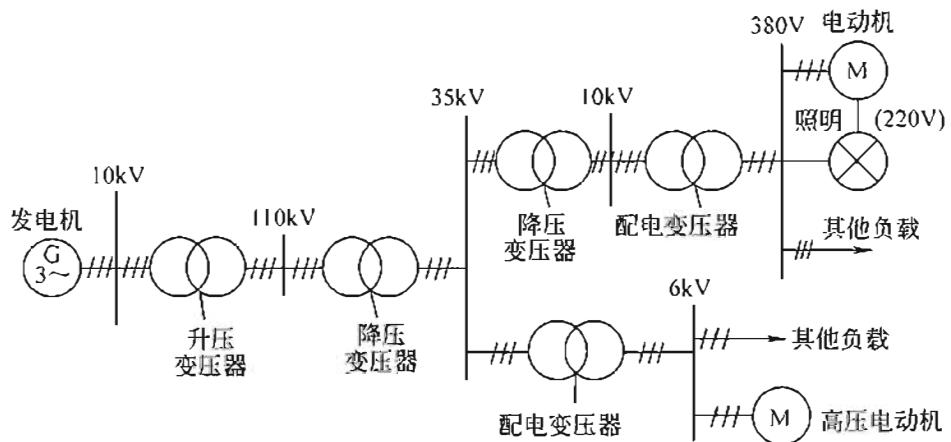


图 1-2 变压器类产品在电力系统中的应用

3. 配电变压器

配电变压器是一种常用的电力变压器，其构造简单，基本组件都有（见图 1-3）。

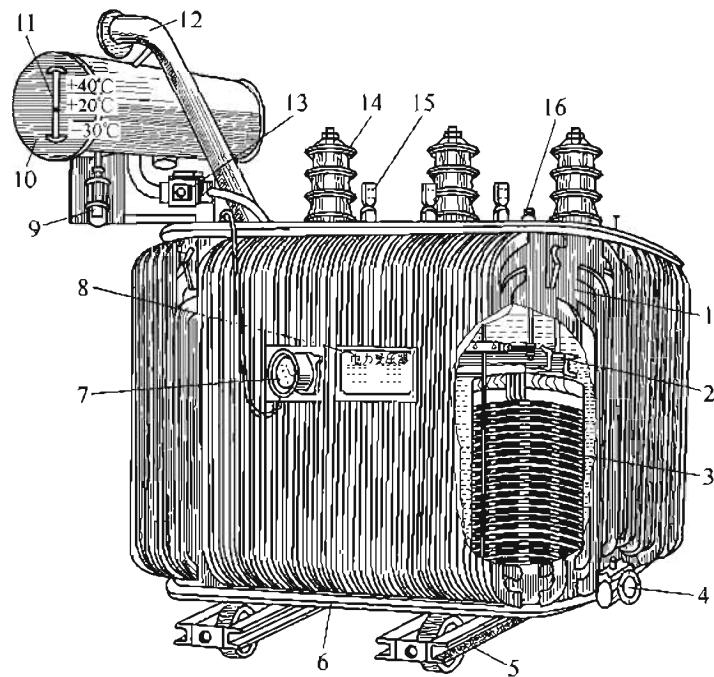
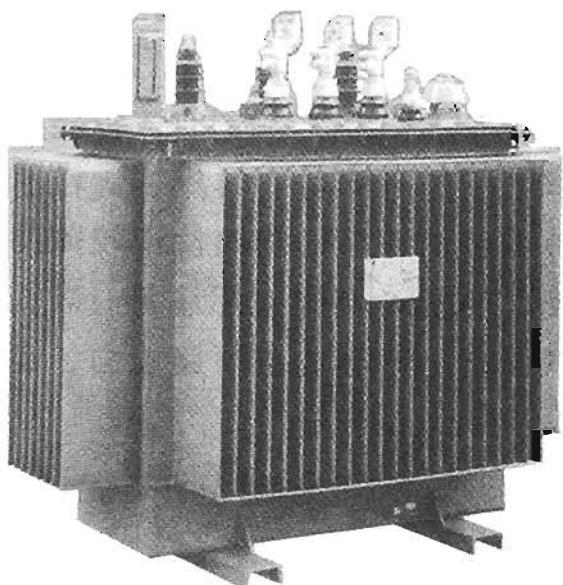


图 1-3 配电变压器

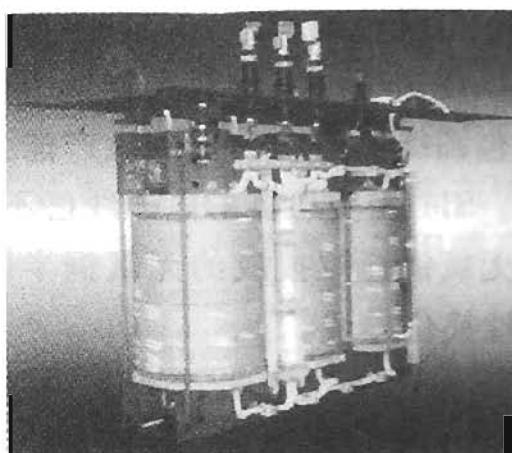
1—油箱；2—铁芯；3—绕组及绝缘；4—放油阀门；5—小车；6—接地螺栓；7—信号温度计；8—铭牌；9—吸湿器；10—储油柜；11—油表；12—安全气道；
13—气体继电器；14—高压套管；15—低压套管；16—分接开关

4. S11 型全密封配电变压器

S11 型叠铁芯变压器是在原有配电变压器技术基础上开发的新产品（见图



(a) 外形



(b) 心体

图 1-4 S11 型全密封配电变压器

1-4)。具有低损耗、低噪声、抗短路能力强、抗冲击性好及运行经济等特点，尤其适合农网等负载率较低的场所。

5. R型卷铁芯变压器

目前电力变压器的铁芯多为叠片式，这种结构存在一定局限性，即铁芯构成的闭合磁路中有空气间隙存在，从而导致磁阻和漏磁增加，而卷铁芯变压器采用较薄的高导磁冷轧硅钢片制造，充分发挥薄片涡流损耗低的优势，使空载损耗可以下降，故其具有体积小、损耗低、噪声低的特点，是新一代环保高效节能产品。适用于城乡、工矿企业电网改造，更适用于组合式变压器和预装式变电站。图 1-5 所示是 R 型卷铁芯变压器外形及 R 型铁芯与截面，截面图中一个台阶为一片硅钢片。

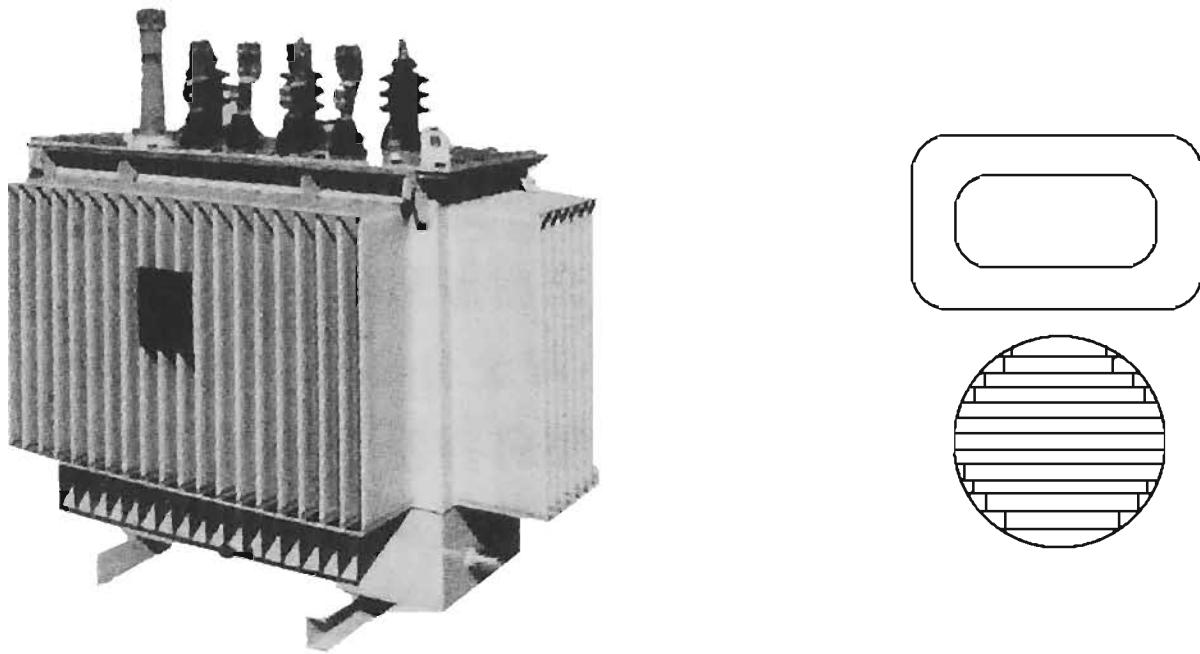


图 1-5 R 型卷铁芯变压器

6. 立体卷铁芯变压器

立体卷铁芯变压器的高压绕组为层式，低压绕组对容量 $500\text{kV}\cdot\text{A}$ 及以下的为层式，容量为 $630\text{kV}\cdot\text{A}$ 及以上的采用箔式绕组。外形见图 1-6。立体卷铁芯变压器比平面卷铁芯变压器性能好，有明显优势。但技术尚不十分成熟，有待进一步发展。

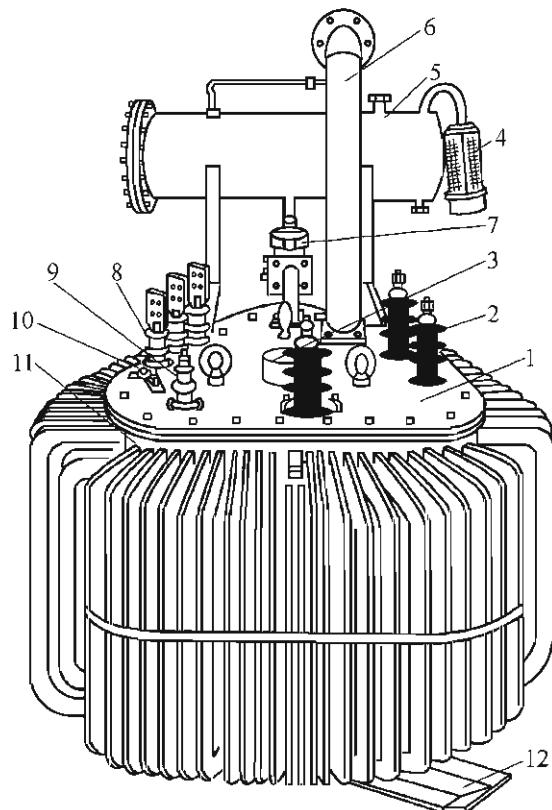


图 1-6 立体卷铁芯变压器

1—油箱盖；2—高压绝缘套管；3—分接头开关；4—吸湿器；
5—储油柜；6—安全气道；7—气体继电器；8—低
压绝缘套管；9—中性点引出线绝缘套管；
10—温度计；11—油箱；12—底座

7. 树脂浇注干式变压器

树脂浇注干式变压器是近年来在引进国际先进变压器设计及制作工艺的基础上，研发改良的少填料、薄绝缘干式变压器产品，具有局部放电小、噪声低、损耗少、散热性能好、防潮能力强、抗突发短路能力强、过载能力大、造型美观等优点的新产品。

8. 敞开式干式变压器

这种新型敞开式干式变压器的型号是 SG10 或 SGB10，前者是普通导线绕组，后者是箔式绕组（见图 1-7 和图 1-8）。主要特点是采用杜邦诺迈克纸为基础的绝缘系统、H 级耐热绝缘等级、无需风机冷却，允许长期过载 20% 运行。低损耗、局部放电量小、噪声低、不产生有害气体、对湿度与灰尘不敏感。适用于防火要求

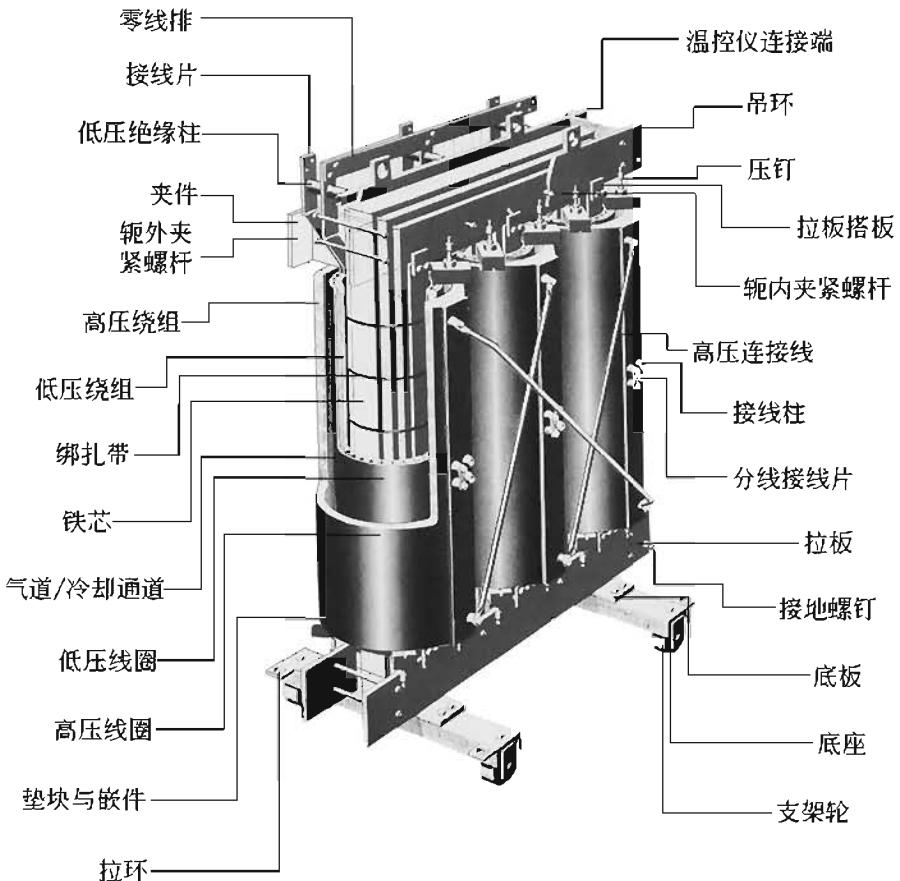


图 1-7 树脂浇注干式变压器

高、负载波动大以及污秽潮湿环境。

由于有以上优点，目前发展很快，有替代其他类型干式变压器的趋势。

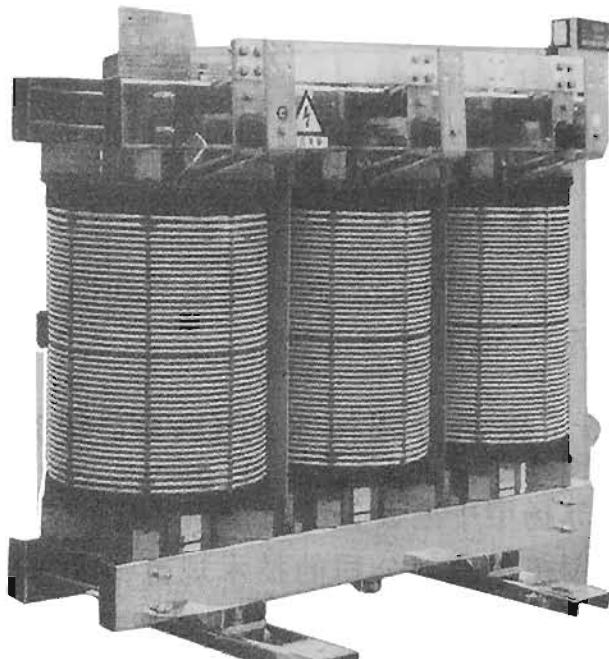


图 1-8 敞开式干式变压器

9. WSG3 系列非封闭式干式变压器

非封闭式干式变压器也可称浸渍式干式变压器，因为该变压器绕组在绝缘漆中浸渍过。其器身与大气相连，适用于环境温度比较干燥而洁净的室内环境。电压在15kV以下，空气自冷式变压器容量可达 $1000\text{kV}\cdot\text{A}$ 左右，若更大容量时可用风冷。

由于它以空气为绝缘介质，所以外形尺寸比树脂型产品大，重量也较重。所以电力变压器只有在地下铁道、公共建筑物、车间内部等防火要求较高的场所才使用干式变压器。WSG3系列非封闭式干式变压器如图1-9所示。

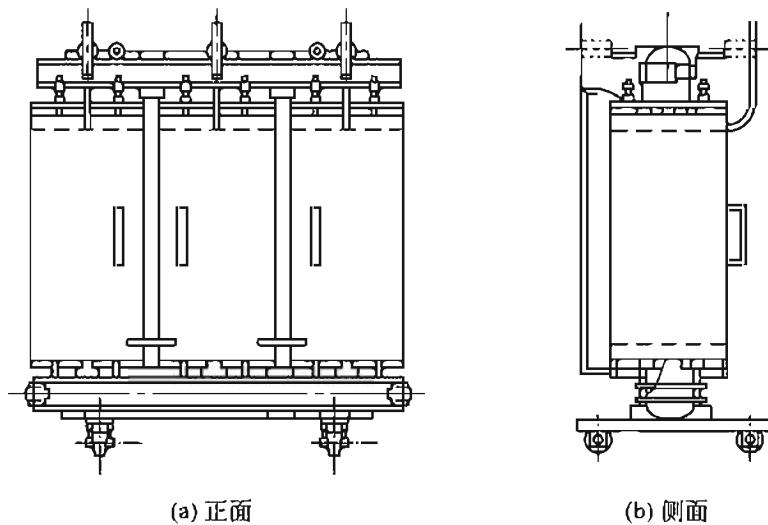


图1-9 WSG3系列非封闭式干式变压器

10. 矿用变压器

矿用变压器适用于煤矿井下含有甲烷气体和煤尘等易爆炸的危险场所（见图1-10）。该矿用变压器按有关国家防爆标准设计、制造和检验。

11. KSG-2.5、4/0.66 矿用隔爆型干式变压器

KSG-2.5、4/0.66矿用隔爆型干式变压器（见图1-11）适用于煤矿井下有沼气和煤尘的爆炸危险场所，在交流50Hz、电压至660V的供电线路中，为煤电钻提供127V电源。该变压器按有关国家防爆标准设计、制造和检验。

12. 试验变压器

(1) 试验变压器的特点

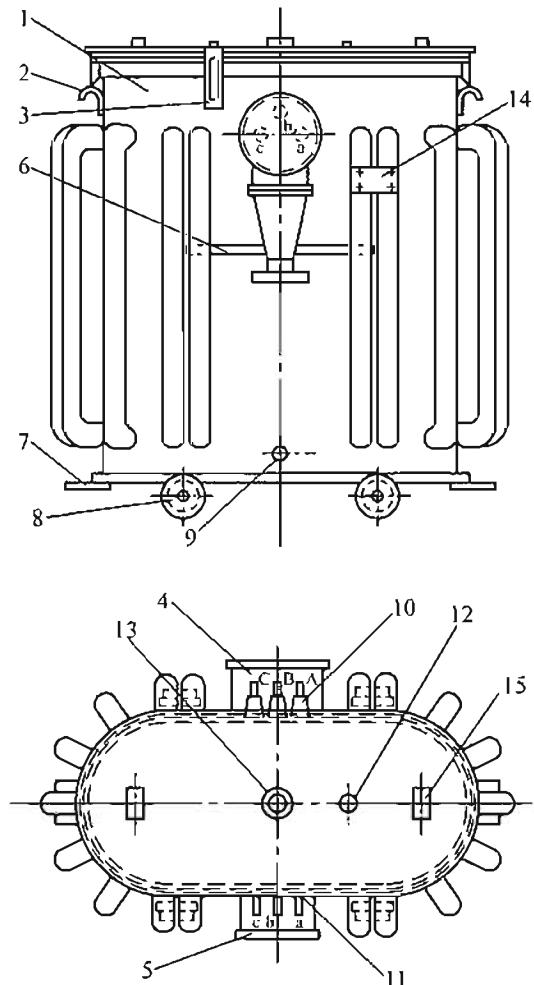


图 1-10 矿用变压器

1—油箱；2—吊攀；3—油表；4—高压接线盒；5—低压接线盒；6—接地螺栓；7—拉板；8—滚轮；9—放油塞；10—高压瓷套管；11—低压瓷套管；12—温度计座；13—注油塞；14—铭牌；15—吊攀

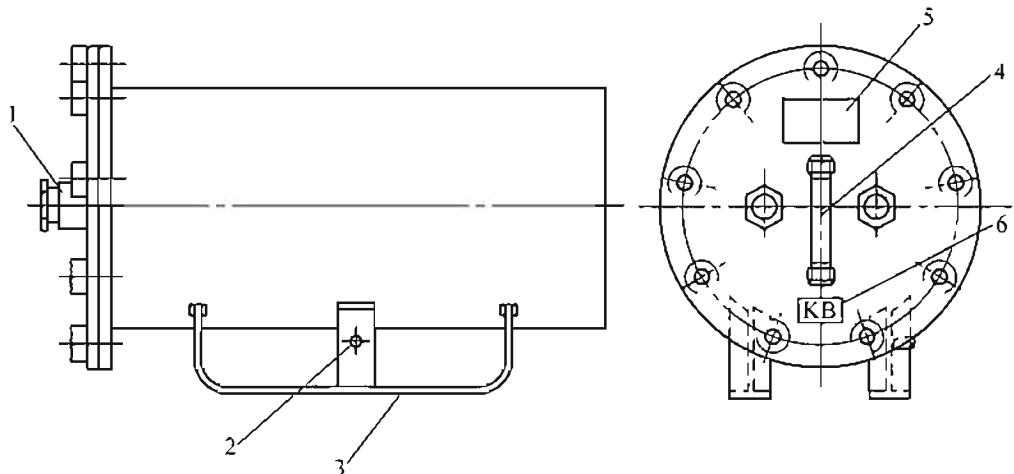


图 1-11 KSG-2.5、4/0.66 矿用隔爆型干式变压器

1—出线管；2—接地螺栓；3—拖攀；4—吊攀；5—铭牌；6—“隔爆型” 标志

① 二次电压高而电流小，电流通常为 $0.1\sim1A$ ，对于电容量大的电缆和大型电机等负载电流，电流最大可达 $4A$ ；单台试验变压器二次电压可达 $750kV$ 以上。

② 一般为单相。

③ 二次绕组首末端绝缘水平不同，首端为高压，末端直接接地或通过电流表接地。

④ 多为短时工作制。

(2) 试验变压器的结构

这种试验变压器结构是以绝缘筒代替油箱和两个高压套管，绝缘筒既作容器又作外绝缘（见图 1-12）。铁芯为双柱式，双柱上下排列。整个铁芯对地须用绝缘件支撑起来。高压绕组首端 A 与金属上盖连在一起，末端 X 及低压绕组两端 a、x 从底座引出。结构体积小、重量轻，常用于 $250kV \cdot A$ 及以下产品。

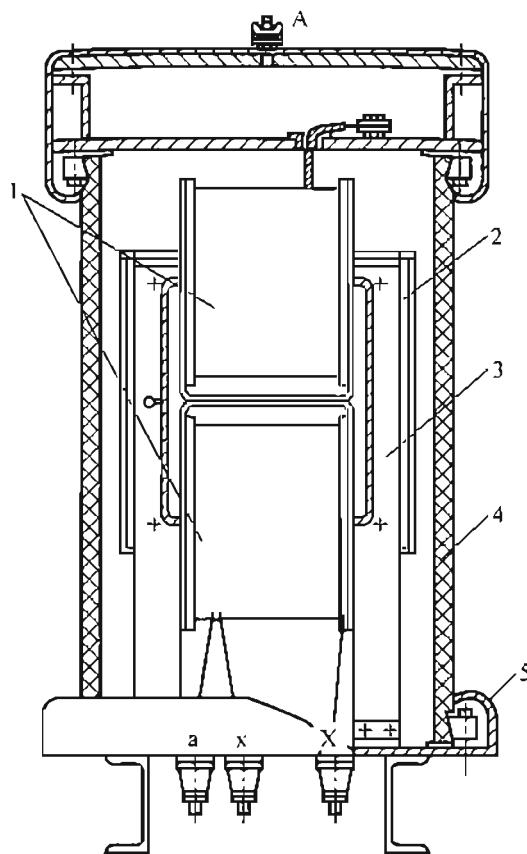


图 1-12 绝缘筒式试验变压器结构图

1—绕组；2—铁芯；3—绝缘件；4—绝缘筒；5—屏蔽罩

13. 组合式变压器

20世纪90年代，美国台装分仓式三相配电变压器进入我国市场。该变压器中高压电缆在高压仓内通过电缆插接件和变压器连接，低压电缆在低压仓内用螺栓和低压端子连接。台装分仓式配电变压器的油箱内装有高压熔断器和负荷开关，使变

压器既可作终端运行，也可环网运行，并对变压器高压侧的供电状态进行保护和控制。我国的变压器制造商在低压仓内加装了低压断路器和计量电表，使它成为一种组合配电装置。这种组合装置取代Ⅲ型变电广泛用于住宅小区（见图 1-13）。

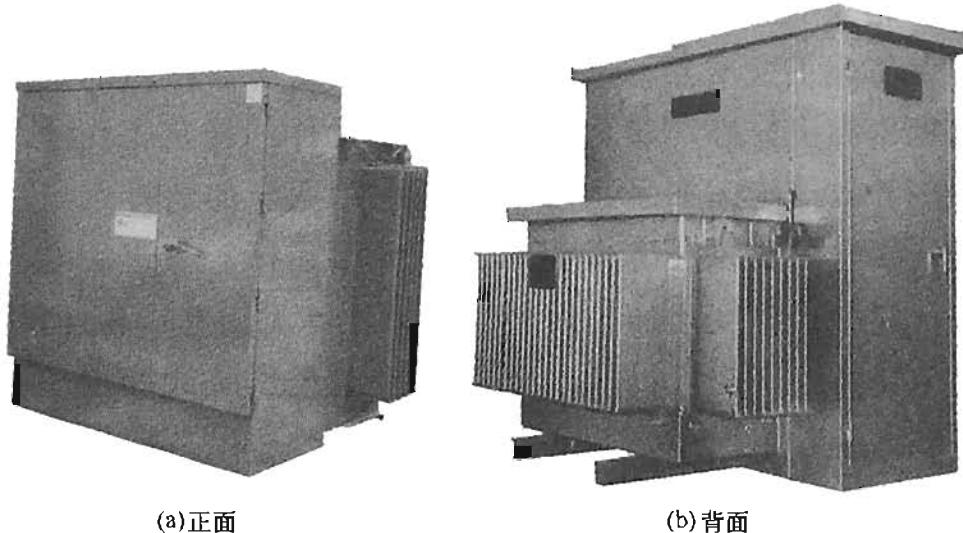
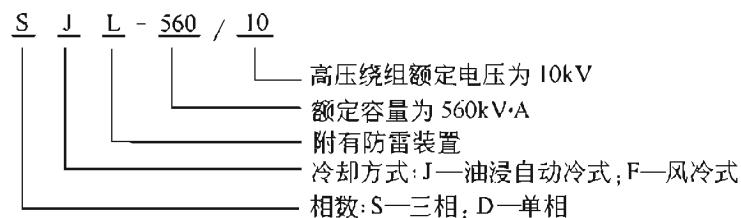


图 1-13 组合式变压器

14. 变压器的主要技术参数

(1) 变压器型号的含义



(2) 额定电压

原边的额定电压是指考虑到变压器的绝缘强度允许发热所规定的电压值，单位是 V。副边的额定电压是指变压器在满载时，原边加上额定电压后副边两端的电压值。

对三相变压器额定电压是指线电压。

(3) 额定电流

根据变压器在允许温升条件下，所规定满载电流值，单位是 A。

对三相变压器额定电流是指线电流。

(4) 额定容量

变压器传递之最大功率，即变压器副边额定电压和额定电流的乘积，单位是 V · A。

(5) 温升

温升是变压器在额定情况下运行允许超出环境温度的数值，取决于变压器绝缘材料的等级。

(6) 额定频率 (f_N)

是指变压器在额定电压、额定电流和额定功率下，能够正常运行的电源频率。常用电源变压器的额定频率为 50Hz。国际上有些国家电源频率定为 60Hz。

(7) 空载损耗 (P_0)

空载损耗是变压器空载状态时有功功率的损失，即变压器一次侧加额定电压，二次侧开路时变压器的损耗。空载时变压器的铜损很小，主要由铁芯的磁滞损耗和涡流损耗引起，所以空载损耗也叫铁损，其损耗主要转化为热能。

(8) 短路损耗 (P_d)

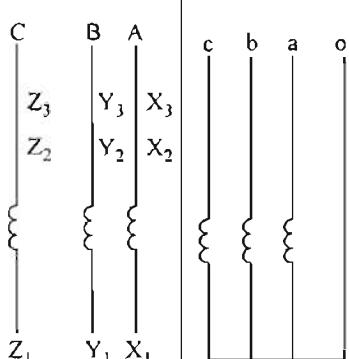
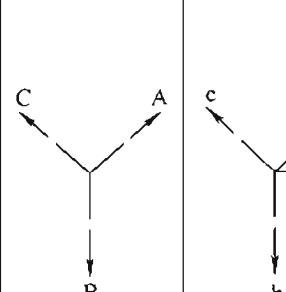
短路损耗是变压器短路时，即变压器绕组二次侧短路，在一次侧绕组中通入额定电流时变压器的损耗。由于该损耗主要是消耗在绕组电阻上的有功损耗，绝大部分转化为热能，所以又称为铜损。

(9) 连接组别

表示变压器各绕组的连接方式及一、二次侧绕组电压之间的相位差。

15. 变压器的铭牌举例

表 1-2 变压器铭牌

电力变压器					
产品标准			型号		SJL-560/10
额定容量 560kV·A			相数 3	额定频率 50Hz	
额定电压	高压	10000V		高压	32.3A
	低压	400~230V	额定电流	低压	808A
使用条件	户外式		线圈温升 65℃		油面温升 55℃
油重 370kg			器身重 1040kg		总重 1900kg
线圈连接图		向量图		连接组标号	开关位置
高压	低压	高压	低压	Y/Y ₀ -11	分接电压
		I 10500V			
					II 10000V
					III 9500V
出厂序号	XX厂		年	月	出品

第二章

变压器的基本知识及工作原理

大小和方向都不随时间而变化的电流、电压和电动势称为直流电。大小和方向都随时间作周期性变化的电流、电压和电动势称为交流电。大小和方向都随时间按正弦规律周期性变化的电流、电压和电动势称为正弦交流电。

交流电相对于直流电的优越性在于：交流电可利用变压器将电压升高和降低，从而实现远距离输电，直流电是不可能的；并且交流发电机可制成很大容量，结构上比直流发电机简单；交流电动机比直流电动机坚固耐用，且便于维护。

正弦交流电完成一次正负的交替变化称为一周波。正弦交流电经历一周波变化所需的时间叫做周期。正弦交流电在 1s 时间内交变的次数称为频率。正弦交流电在 1s 内所经历的角度数称为角频率，即 $\omega = 2\pi f$ 。

在正弦交流电中任意时刻正弦交流电的数值称为瞬时值。最大瞬时值称为最大值。对于正弦交流电流，它的做功能力相当于多大数值的直流电流，这个直流电流的数值就叫做那个正弦交流电流的有效值。如不加以特别说明，交流电的大小往往用有效值来计量。

电感是线圈的磁链与流过线圈电流的比值，也叫自感系数，它的大小与线圈的结构尺寸、匝数及线圈内媒质的导磁系数有关。

电容器是被绝缘材料分隔开的任何两块金属体或任何形状的导体所构成的整体。平板电容器的电容量与极板面积成正比，与极板间的距离成反比，还与极板之间的绝缘介质的性质有关。

电路的基础知识包括掌握交流电的基本概念，掌握纯电阻、纯电感、纯电容电路的特点，掌握三相交流电路电源和负载的星形和三角形接法的特点，了解各自电压、电流、功率之间的关系。

变压器是根据电磁感应原理中的自感和互感现象制成的器件。最简单的变压器是由一个矩形铁芯和两个分装在两侧互相绝缘的线圈组成的。其中一个线圈与交流电源相接，称初级线圈或一次线圈，另一个线圈与用电设备相接，称次级线圈或二次线圈。当交流电通过初级线圈时，由于铁芯是导磁的，就在铁芯内产生交变的磁力线。变化的磁力线通过两边线圈，由于自感和互感现象，就在两个线圈中都感应出电动势，而且它的频率等于初级线圈的频率。两个线圈中感应电动势的大小和初级线圈中交流电的频率、大小和线圈的匝数和铁芯的导磁率有关。经过实验可得变压器初、次级线圈上电动势之比，等于初、次级线圈匝数比。因此，只要适当设计初、次级线圈的匝数，即可任意改变电源的电压。把低电压升高的变压器称升压变压器，把高电压降低的变压器称降压变压器。

三相电源和三相负载都有星形和三角形两种接法。三相电源和三相负载的连接方式有 Yy、Yd、Dd、Dy（对于高压绕组分别用符号 Y、D 表示，对于中压和低压绕组用符号 y、d 表示）。

在 Yy 接三相电路中，通常三相电压对称，如果三相负载也对称，则不论有无中线，中性点之间的电压为零，如三相负载不对称且无中线，或中性线阻抗较大，

则电源中性点和负载中性点间电压不为零，这种现象称为中性点位移。在三相四线制供电系统中，中性线的作用就是使星形连接的三相不对称负载的电压保持对称。因为中性线为三相不对称线路提供了一条通路，使电源中性点与负载中性点用中性线连通，减少了中性点位移，使各相负载电压比较稳定。如果中性线断开，将产生严重的中性点位移，使各相负载电压改变，甚至不能正常工作。

1. 交流电的基本概念

交流电是指大小和方向随时间作周期性变化的电动势（电压或电流）。交流电按正弦规律变化的就叫正弦交流电。交流电与直流电的波形见图 2-1。

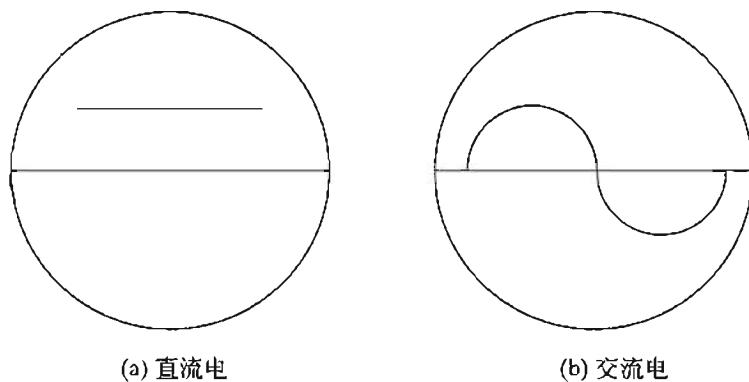


图 2-1 直流电与交流电的波形图

频率、幅值和初相位是正弦交流电的三要素。

交流电每秒钟变化的次数称为频率 f ，单位：赫兹（Hz）。我国工业和日常生活中供电采用的是频率 50Hz 的正弦交流电。

2. 初相角的波形图

初相角 ϕ 即为正弦量起始时间的相位，在波形图上，初相角定为正弦波的起点与坐标原点之间的夹角。不同初相的波形图如图 2-2 所示。

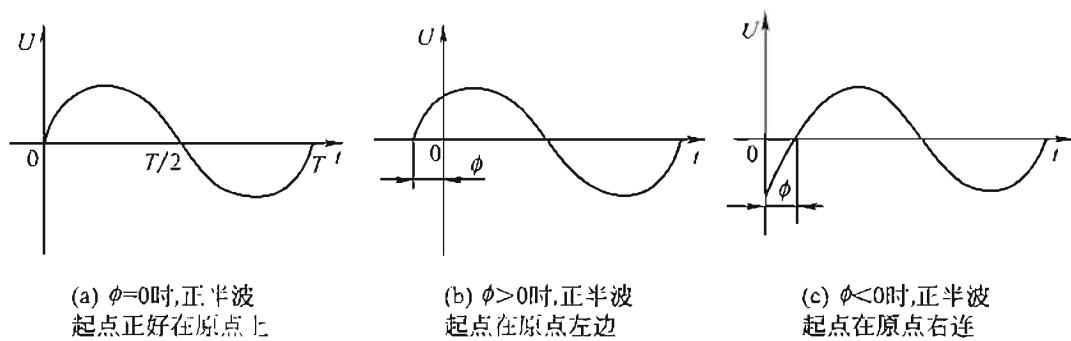


图 2-2 不同初相的波形图

3. 单相交流电路的纯电阻电路

单相交流电路是指在交流电路中只有一个交变电动势。交流负载只有电阻，如白炽灯、电烙铁、炉子等电器组成的电路可近似看成纯电阻电路，如图 2-3 (a) 所示。其中电压和电流间的关系符合欧姆定律 $I=U/R$ ，且同频率、同相位，如图 2-3 (b) 所示。任一瞬间的电压和电流的乘积为该电阻所消耗的瞬时功率，即 $p=ui$ ，可看出，不论电流的方向如何，功率均为正（阴影部分）。这说明电能全被电阻消耗。

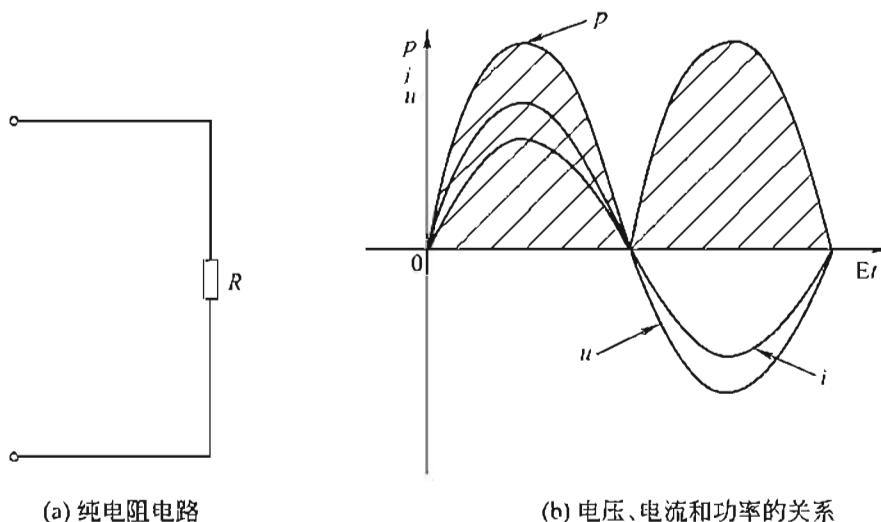


图 2-3 纯电阻电路及电压、电流和功率的曲线图

4. 单相交流电路的纯电感电路

(1) 电动机、变压器等电器组成的电路可以近似的称为纯电感电路。

当线圈中通入交流电时会产生感应电动势，对原有的交流电产生阻碍作用，称为线圈的感抗，见图 2-4 (a)。其计算公式为： $X_L = \omega L = 2\pi f L$ 。

(2) 电流与电压的相位关系

从图 2-4 (b) 看出，电压总是超前电流 90° 。

(3) 电流与电压的频率关系

电流与电压是同频率的。

(4) 电流与电压的数量关系

对于电流与电压有效值（或最大值）符合欧姆定律，即 $I=U/X_L$ 。

注意：电流与电压瞬时值之间不符合欧姆定律。

(5) 功率

在纯电感电路中电压瞬时值与电流瞬时值之间的乘积称为瞬时功率。从图 2-4

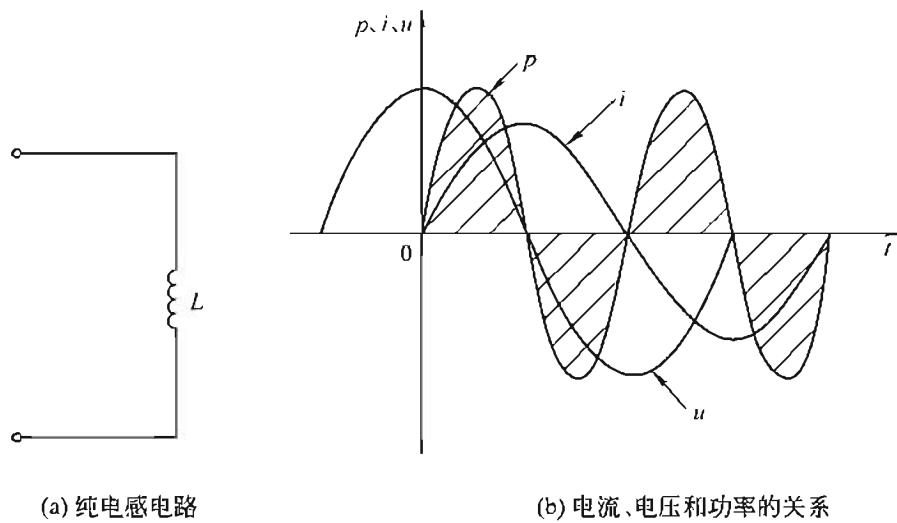


图 2-4 纯电感电路及电流、电压和功率的曲线图

(b) 可看出，瞬时功率在一个周期内的平均值为零，即纯电感电路不消耗电能，但电感和电源间却进行着能量交换，通常用无功功率 Q_L 来反映纯电感电路的能量交换。表达式为：

$$Q_L = U_L I = I^2 X_L = U_L^2 / X_L$$

5. 电容器

电容器（见图 2-5）在电网中常用来改善功率因素、启动单相电动机，保护开关触点等，应用广泛。电容器储存电荷的能力用 C 表示，单位法拉（F）、微法（ μF ）、皮法（ pF ）。换算关系为： $1\text{F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{pF}$ 。

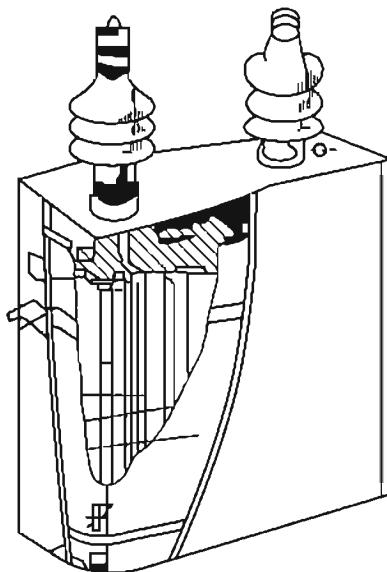


图 2-5 电容器外形

电容器能导通交流电，但同时对交流电产生阻碍作用，称之为容抗，用 X_C 表示，单位欧姆（ Ω ）。容抗的大小和电容量 C 及交流电的频率 f 成反比，即：

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

电容器有“隔直通交”的特性，从上式可知，当频率趋近零时，容抗趋于无穷大，所以直流不能导通；当频率趋于无穷大时，容抗等于零，因此电容器对于高频交流电来说是处于短路状态。

6. 单相交流电路的纯电容电路

纯电容电路及电流、电压和功率的曲线图如图 2-6 所示。

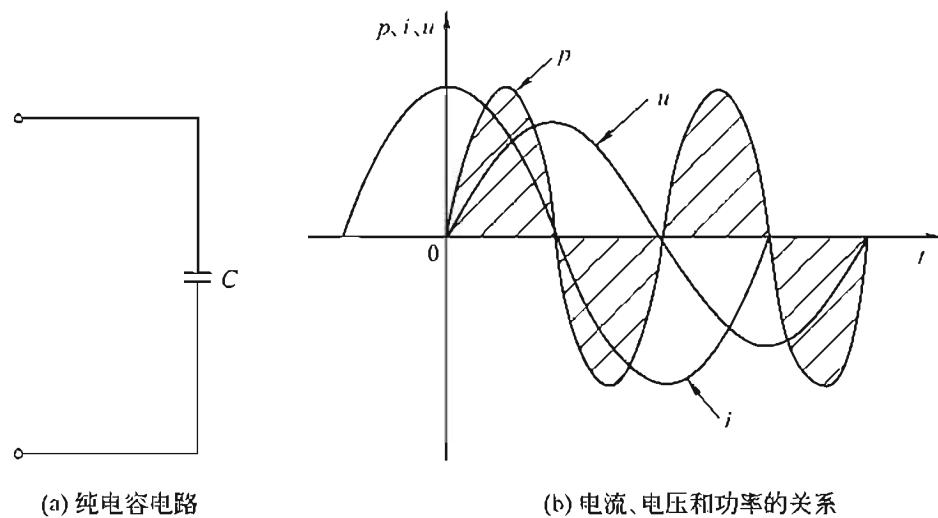


图 2-6 纯电容电路及电流、电压和功率的曲线图

(1) 电容量与容抗

容抗的大小与电容量 C 及交流电的频率成反比，即：

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

(2) 电流与电压的相位关系

在纯电容电路中电压滞后电流 90° 。

(3) 电流与电压的频率关系

电流与电压是同频率的。

(4) 电流与电压的数量关系

电流与电压有效值（或最大值）符合欧姆定律，即 $I = U/X_C$ 。注意：电流与电压的瞬时值之间不符合欧姆定律。

(5) 电容电路的功率

电容电路的瞬时功率为 $p_C = u_C i$ ，平均功率为零。说明纯电容电路在储存和释放电场能量的过程中没有能量消耗。把电容电路中能量转化的最大功率也称为无功功率，符号为 Q_C ，单位为乏（V_r）或千乏（kV_r），表达式为：

$$Q_C = U_C I = I^2 X_C = U_C^2 / X_C$$

7. 三相交流电源的星形接法

三相电源是由三相交流发电机产生的，通过变压器、输配电线路输送到用户。

三相电有三相绕组，将三相电源的末端连接为一个节点，而始端分别用导线引出连接负载，这种连接方法叫星形连接（Y），如图 2-7 所示。三相绕组末端连成的公共点为电源的中性点，用 O 或 N 表示。有些电源从中性点引出一根导线，则这根导线称为中性线或零线，当中性线接地时也叫地线，从绕组始端引出的导线称相线。

三根相线和一根零线组成的供电方式叫做三相四线制供电，常用于低压配电系统；不引出中线，由三根相线供电称为三相三线制，用于高压输电。

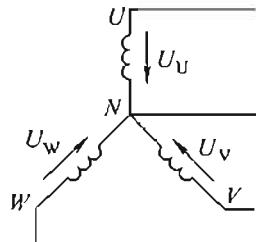


图 2-7 三相电源的星形接法

8. 交流电源星形连接的相电压和线电压

在星形连接的线路中有两种电压，一种是相电压，另一种是线电压。如图 2-8 所示， U_{UO} 、 U_{VO} 、 U_{WO} 分别表示 U、V、W 三相电源的相电压，线电压为任意两相电源之间的电压，如图 2-8 中 U_{UV} 、 U_{UW} 、 U_{VW} 分别表示 UV、UW、VW 之间的线电压。线电压的有效值用 $U_{\text{线}}$ 表示， $U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{\text{相}}$ 。

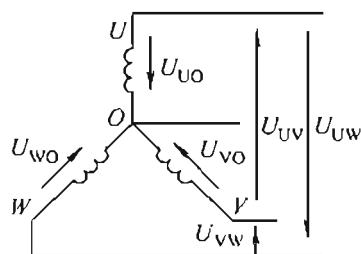


图 2-8 电源星形连接的相电压和线电压

9. 三相交流电源的三角形接法

三相电源绕组依次首尾相连构成闭合回路，再从三个连接点引出三根导线接负

载叫做三角形连接 (Δ)，如图 2-9 所示。三角形连接的供电方式为三相三线制，三角形连接时线电压等于相电压，即 $U_{\text{线}} = U_{\text{相}}$ 。

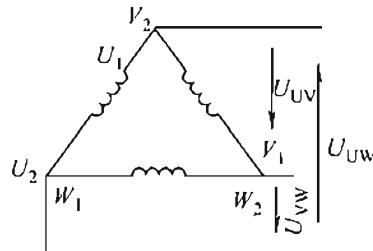


图 2-9 三相电源的三角形接法

10. 三相负载的星形连接

三相负载按其接法不同可分为星形连接和三角形连接。图 2-10 是三相负载的星形连接。将负载末端连接成节点也叫中点，负载的首端分别与电源连接，这就是三相四线制供电电路。

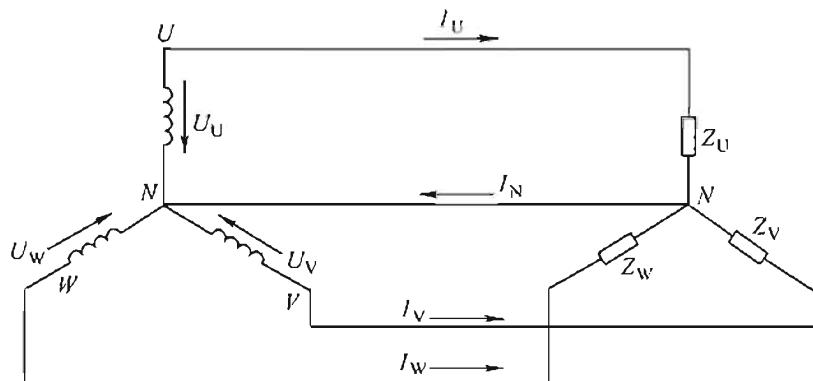


图 2-10 三相四线制供电

一般单相负载平均分配在三相四线制系统上。

11. 三相负载的三角形连接

三相负载首尾相接，构成一个闭合回路，把三个连接点与电源相连就是三角形连接，如图 2-11 所示。

在三角形连接中，由于负载直接跨在电源的线电压上，所以负载中的相电压等于线电压，即 $U_{\text{线}} = U_{\text{相}}$ 。

12. 互感现象

两个具有一定圈数的闭合回路 N_1 和 N_2 ，当 N_1 电路的电流变化时，它的磁场

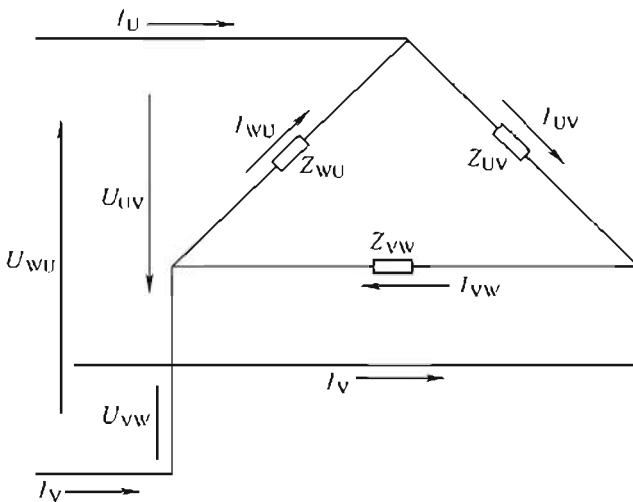


图 2-11 三相负载的三角形连接

也变化。由于 N_1 、 N_2 线圈放在一起，故 N_1 线圈产生的磁力线也大部分经过 N_2 线圈。 N_1 电路中电流变化引起的磁力线变化，会使 N_2 线圈产生感应电动势，从而在 N_2 电路中产生电流。 N_2 线圈也会产生磁场，这个磁场也会使线圈 N_1 产生感应电动势，这种现象称为互感。

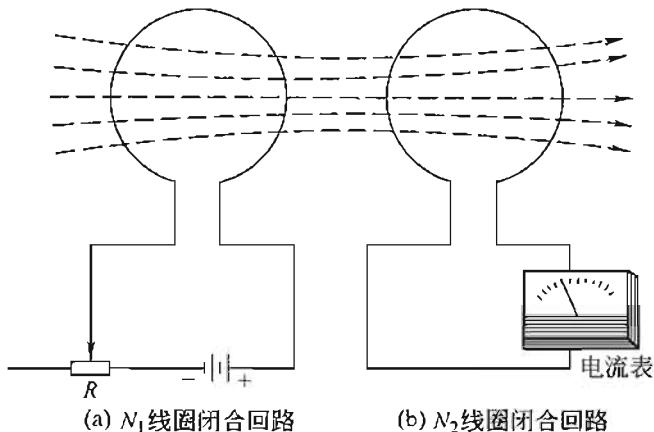


图 2-12 互感现象

变压器是根据电磁感应原理中的自感和互感现象制成的器件，最简单的变压器是由一个矩形铁芯和两个互相绝缘的线圈组成的。

13. 变压器基本组成

单相芯式变压器结构的特点是铁轭靠着线圈顶面和底面，但不包围线圈的侧面，结构简单、绕组装配方便、用铁量少，故电力变压器多采用这种铁芯（见图 2-13）。

单相壳式变压器结构的特点是铁轭不仅包围线圈顶面和底面，还包围线圈的侧面，不用设置专门的外壳。

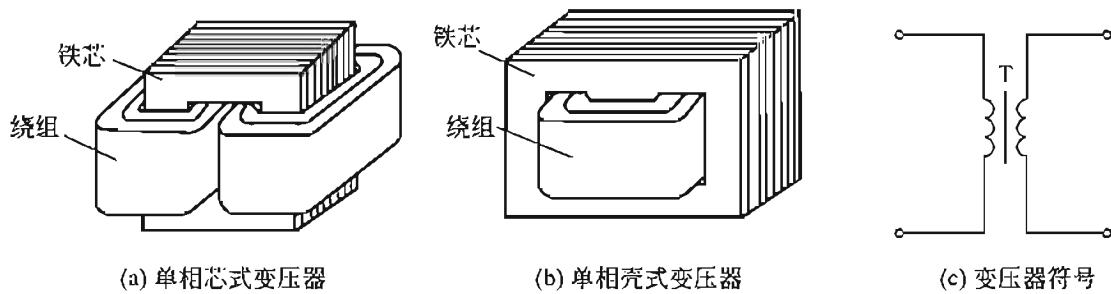


图 2-13 变压器芯式与壳式铁芯

14. 变压器改换电压的基本工作原理

变压器是利用电磁感应原理制成的静止电气设备，它能将某一电压值的交流电转换成同频率的所需电压值的交流电。变压器基本的工作原理如图 2-14 所示。

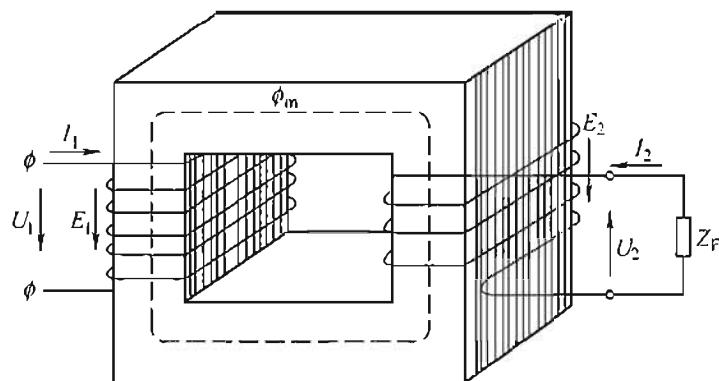


图 2-14 变压器工作原理图

接电源的绕组为一次侧，接负载的绕组为二次侧。在外施电压作用下，有交变电流流过一次侧，在绕组中建立交变磁场，由于铁芯的导磁系数远大于空气和变压器油，磁通绝大多数从铁芯中通过，同时交链一、二次绕组，在一、二次绕组中感应出电动势。根据电磁感应定律，一、二次绕组感应电动势与匝数成正比，合理安排一、二次绕组匝数，就可在二次侧得到所需电压，从而达到改变电压的目的。

15. 变压器的空载运行

变压器一次绕组上接有交流电源，二次绕组不接负载，二次电流为零，这种状态称为变压器空载运行。一次绕组的电流用 I_0 表示。一次绕组的匝数为 N_1 ，则 $I_0 N_1$ 为空载时一次绕组的磁通势。在这个磁通势产生的作用下产生通过铁芯闭合的主磁通 Φ_m 。

由于原、副绕组在同一个铁芯上，所以铁芯中的主磁通同时穿过原副绕组，在原绕组中产生自感电动势 E_1 ，在副绕组中产生互感电动势 E_2 。按照电磁感应的基本定律，这一电动势的大小与磁通所链的绕组匝数以及磁通最大值 Φ_m 成正比。

如果忽略变压器内部压降，即 $U_1 \approx E_1$, $U_2 \approx E_2$ ，可以近似写出下式：

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m (\text{V})$$

$$U_2 \approx E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m (\text{V})$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

此公式是变压器的基本公式之一，表示变压器空载时，一、二次绕组的电压之比近似等于匝数之比，比值 k 称为变压器的变压比（见图 2-15）。

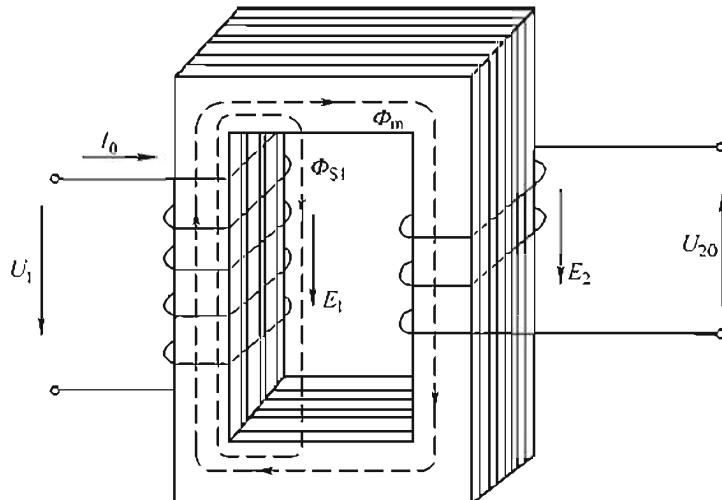


图 2-15 变压器的空载运行原理图

16. 变压器的负载运行

在变压器一次绕组上接有交流电源，二次绕组的两端接上负载 Z_L ，这种状态称为变压器负载运行。

变压器的副边接上负载 Z_L 。在二次绕组 U_2 的作用下，通过负载的电流 I_2 是变压器的负载电流。 I_2 的大小取决于负载阻抗 Z_L 。

变压器的一、二次绕组电流之间的关系，可用磁通势平衡关系进行分析。若二次绕组的匝数为 N_2 ，通过电流为 I_2 ，则磁通势为 $I_2 N_2$ 。变压器负载运行时，铁芯中的主磁通 Φ_m 由一、二次绕组的两个磁通势 $I_1 N_1$ 和 $I_2 N_2$ 共同产生，当电源电压不变时主磁通基本不变。一、二次绕组磁通势 $I_1 N_1$ 和 $I_2 N_2$ 共同产生的磁通和空载磁通势 $I_0 N_1$ 产生的磁通近似相等，这就是变压器负载运行的磁通平衡关系。由于空载电流很小，空载磁通势 $I_0 N_1$ 也很小，可略去不计。由此可得

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = 0$$

$$I_1 \approx -I_2 \frac{N_2}{N_1}$$

式中负号表示 I_1 和 I_2 的相位差为 180° 。

I_1 和 I_2 数值之间的关系为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}$$

由此表明，当二次绕组通过电流时，一次绕组内也要通过相应的电流，一、二次绕组内的电流比近似等于一、二次绕组匝数的反比。这说明变压器不仅改变电压，同时也改变了电流（见图 2-16）。

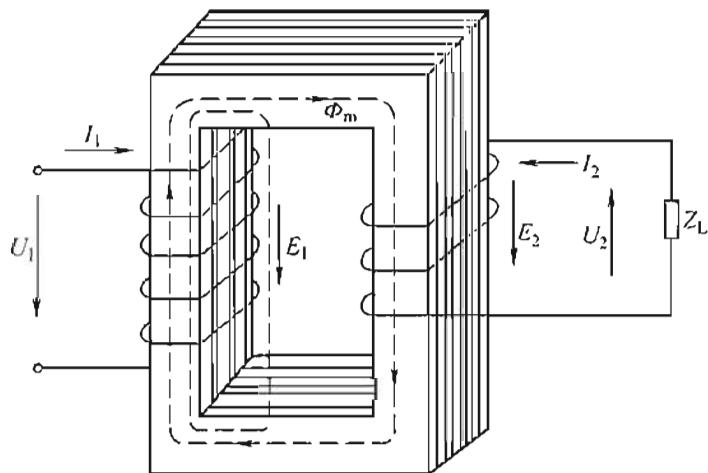


图 2-16 变压器的负载运行原理图

17. 变压器 T型等值电路

变压器一次电路与二次电路本身无电的联系，为了通过简单明了的电路运算，可将一、二次电路通过等值变换（即变换前后不改变一、二次回路中的电量），将一、二次电路合并为一个等值电路，通常称为 T 型等值电路〔见图 2-17 (a)〕。T 型等值电路还不方便运算，进一步简化为图 2-17 (b) 所示近似等值电路和图 2-17 (c) 所示简化等值电路。

18. 配电变压器的接线方法

目前我国常用的变压器有五种，即 Y, yn0；Y, d11；YN, d11；YN, y0 和 Y, y0，前三种常用。Y, yn0 接法的副绕组可以引出中性线成为三相四线制，用作配电变压器时可兼带照明负荷和动力负载。Y, d11 用于副边电压超过 400V 的线路中，这时有一边接成△形，对运行有利。YN, d11 主要用于高压输电线路中，使电力系统的高压侧有可能接地。

19. 自耦变压器的原理

自耦变压器只有一个绕组，如 2-19 图所示。原边电路与副边电路共用一部分

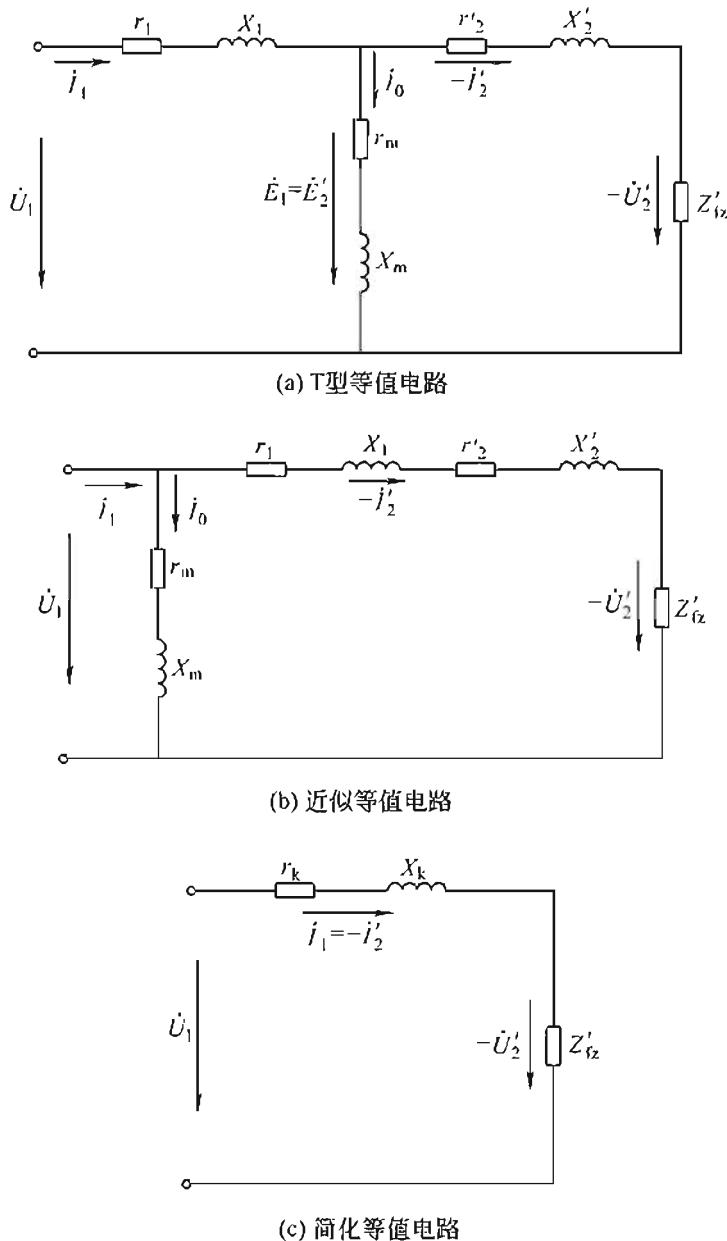


图 2-17 变压器 T 型等值电路

线圈。原、副电路之间除了有磁的联系外，还有直接电的联系。原、副边公共部分的电流为

$$I = I_2 - I_1$$

故副边电流为

$$I_2 = I_1 + I$$

自耦变压器输出边的视在功率为

$$S_2 = U_2 I_2$$

双绕组变压器电功率全部由两个绕组之间的电磁感应来传递，而自耦变压器的电功率一部分是由电磁感应传递，另一部分通过电路直接传递，因此当变压器容量相等时，自耦变压器所用线材及硅钢片比双绕组变压器少，相应短路损耗和铁损也

少。但是自耦变压器一、二次侧的电路直接连在一起，只要一侧发生故障，就直接影响另一侧。五种变压器的接线方式如图 2-18 所示，自耦变压器电器原理图如图 2-19 所示。

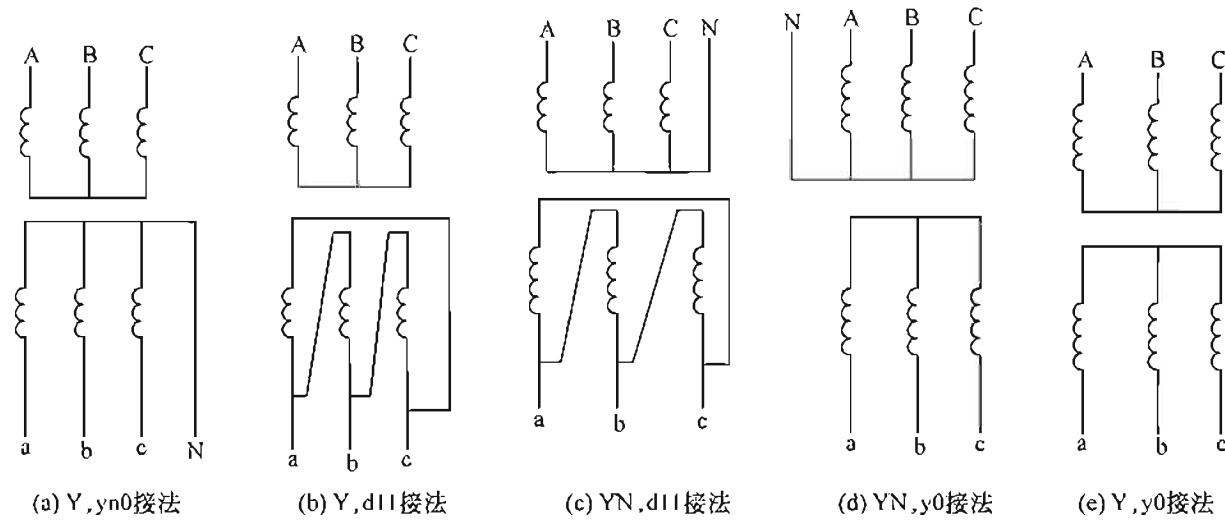


图 2-18 五种变压器的接线方式

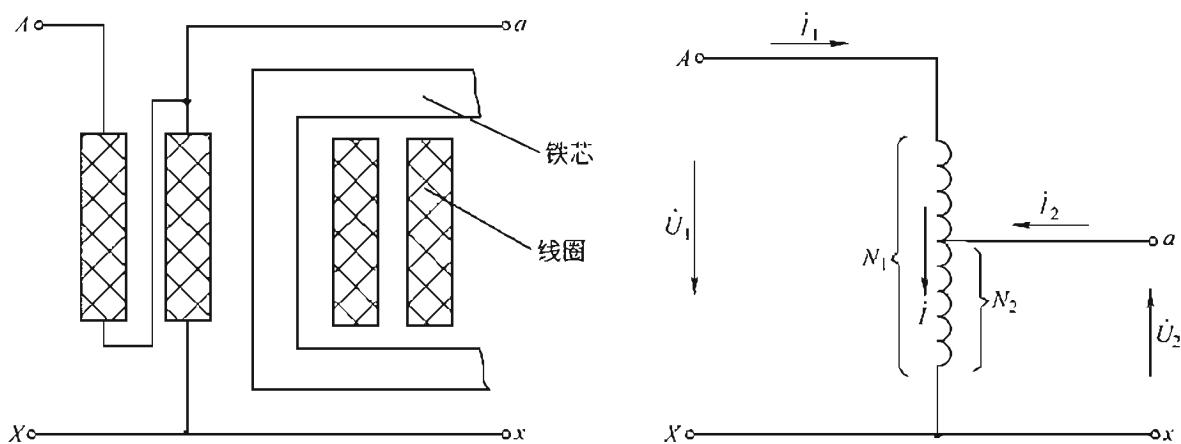
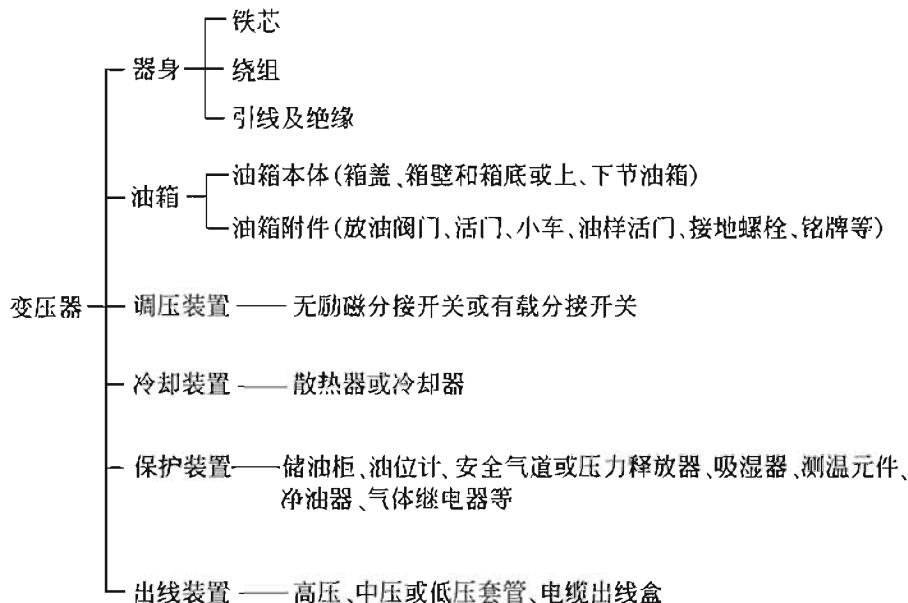


图 2-19 自耦变压器电器原理图

第三章

变压器的结构

各类变压器结构大体相同，电力变压器是使用最普遍的变压器，以其为例说明变压器的构造。变压器的主要结构包括器身、油箱、调压装置、冷却装置、保护装置、出线装置。



铁芯是变压器的磁路部分，它是根据电磁感应原理制造的。变压器原边线圈和副边线圈之间没有电的直接联系，只有通过铁芯形成磁的联系，利用变压器的铁芯可获得强磁场，增强原、副边线圈之间的电磁联系，产生电磁感应现象。铁芯有芯式和壳式、单相和三相、平面式和立体式、叠铁芯和卷铁芯等多种。铁芯两大基本结构形式为壳式和芯式。

线圈是变压器的电路部分，它是用绝缘扁线或圆线绕成的。从高、低压绕组之间的相对位置来看，变压器的绕组可分成同心式和交叠式两类。同心式绕组的高、低压绕组同心套在铁芯柱上，为便于绝缘，一般低压绕组靠近铁芯，高压绕组套装在低压绕组的外面。同心式绕组结构简单，制作方便，目前国产的电力变压器多采用这种结构。交叠式绕组的漏抗较小，易于构成多条并联支路，主要用于低压、大电流的电焊、电炉变压器和壳式变压器中。

由于变压器在运行中长期承受各种工作电压的作用，为保证各带电部分之间，以及带电部分与铁芯及油箱间不发生闪络或击穿，必须有良好的绝缘结构。

变压器的绝缘结构大致可分为：



变压器的引线是指各线圈之间、线圈与出线套管之间、线圈与分接开关之间的连接导线。变压器的引线绝缘是内绝缘的重要部分，有的引线从线圈之间或线圈与铁轭夹件及油箱壁之间穿过，因此，必须保证这些引线有足够的绝缘强度，即绝缘距离。

变压器分接开关也应具有较强的绝缘性。10kV 的无载分接开关一般是以卷制的绝缘纸管作为对地绝缘。35kV 及以上电压等级的无载分接开关的触头部分装于酚醛绝缘纸筒内，绝缘纸筒再装在木架上，操作手柄通过木质绝缘杆与分接开关的动触头相连。有载分接开关对地绝缘是由开关本身的绝缘纸筒及绝缘连板组成的。

变压器油箱主要使绝缘油进行循环，以供变压器冷却散热。变压器油是一种经过提炼的绝缘矿物油，它的主要作用是对变压器起绝缘、冷却及消弧作用。因为变压器油的耐电强度比空气高得多，且变压器铁芯和线圈放入油箱后可避免空气中水分对线圈的影响。通过油的温差作用，受热的油上升到油箱上部，通过油管的上口流向油管，在油管内散热，冷却后又流回油箱底部，变压器就是通过油的循环达到冷却的目的。当油中发生电弧时，在一定范围内，变压器油可以消灭电弧。

变压器的冷却装置大致可分为如下几种。

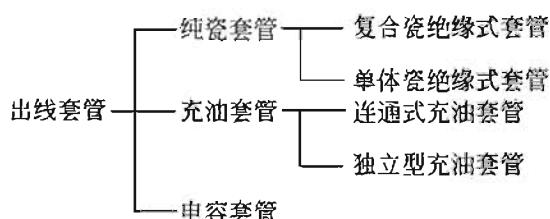
① 油浸自冷式 以油自然对流作用将热量带到油箱壁，然后依靠空气对流传导将热量散发。

② 油浸风冷式 在油箱壁或散热管上加装风扇，利用吹风机帮助冷却，加装风机后，变压器容量可增加 30%~35%。

③ 强迫油循环 利用油泵把变压器中的油冷却后再抽回油箱，油冷却器做成易散热的特殊的螺旋管式，利用风扇吹风或循环水作冷却介质把热量带走。若把油循环速度提高 3 倍，变压器容量可增加 30%。

④ 干式风冷式 干式风冷式变压器可用于低电压变压器，不用油浸，可减少体积、重量。

变压器的套管是将变压器线圈的引线分别引到油箱顶部的绝缘装置。它是引线对地（油箱）的绝缘，又是引线的固定装置。因此套管必须具有绝缘强度、机械强度、热稳定性。出线套管一般分成：



此外，吸湿器、净油器、储油柜、温度计、气体继电器等是变压器不可缺少的部件。

① 吸湿器的作用：进入储油柜的潮湿空气中的潮气被硅胶吸收，可以避免潮气进入储油柜。

② 储油柜的作用：调节油量、保证油箱油量。当油箱内油的体积随着油温降低而下降时，储油柜将储存的油补充到油箱内，储油柜可减少油和空气的接触面，防止老化和受潮。

③ 温度计的作用：当变压器温度过高时，将迅速发出信号。

1. 配电变压器结构（见图 3-1）

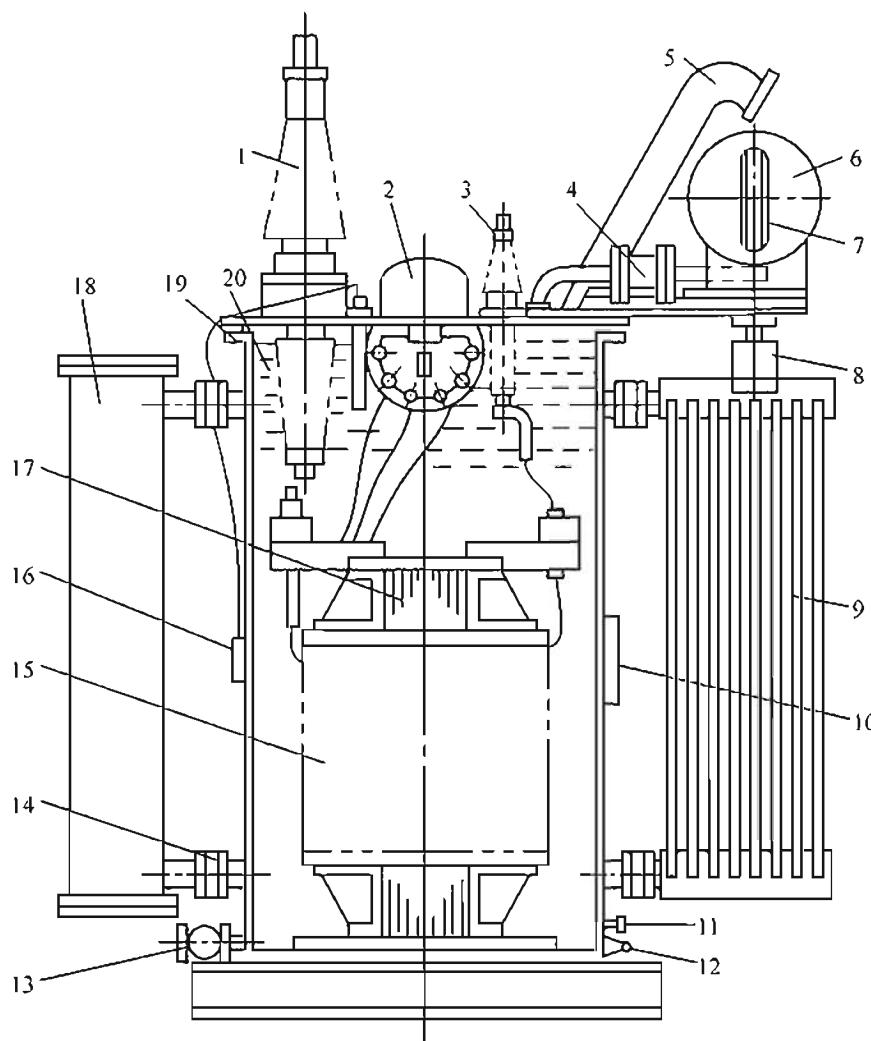


图 3-1 配电变压器结构

- 1—高压套管；2—分接开关；3—低压套管；4—气体继电器；5—防爆管；6—储油柜；
- 7—油位计；8—吸湿器；9—散热器；10—铭牌；11—接地螺栓；12—油样活门；
- 13—放油阀门；14—活门；15—绕组；16—信号温度计；17—铁芯；18—净油器；19—油箱；20—变压器油

2. 变压器器身结构（见图 3-2）

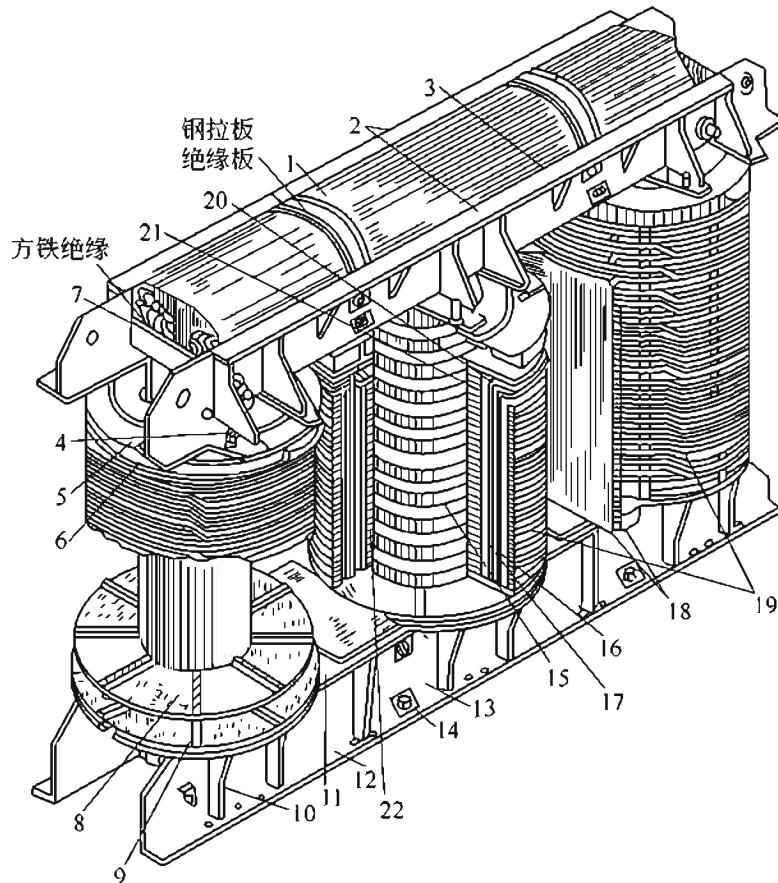


图 3-2 变压器器身结构

1—铁轭；2—上夹件；3—上夹件绝缘；4—压钉；5—绝缘纸圈；6—压板；
 7一方铁；8—下铁轭绝缘；9—平衡绝缘；10—下夹件加强筋；11—下
 夹件上肢板；12—下夹件下肢板；13—下夹件腹板；14—铁轭螺栓；
 15—铁芯柱；16—绝缘纸筒；17—油隙撑条；18—相间隔板；
 19—高压绕组；20—角环；21—静电环；22—低压绕组

3. 变压器铁芯基本类型

铁芯有芯式和壳式两大基本结构形式（见图 3-3）。它们的主要区别在于磁路，芯式变压器的铁芯柱被绕组所包围，壳式变压器的铁芯包围着绕组。芯式变压器结构简单，易于制造。电力变压器一般都采用芯式变压器。

铁芯是构成变压器磁路的部件，由铁芯柱和铁轭两部分组成，铁芯柱上套装有绕组，而铁轭使整个磁路形成闭合回路。

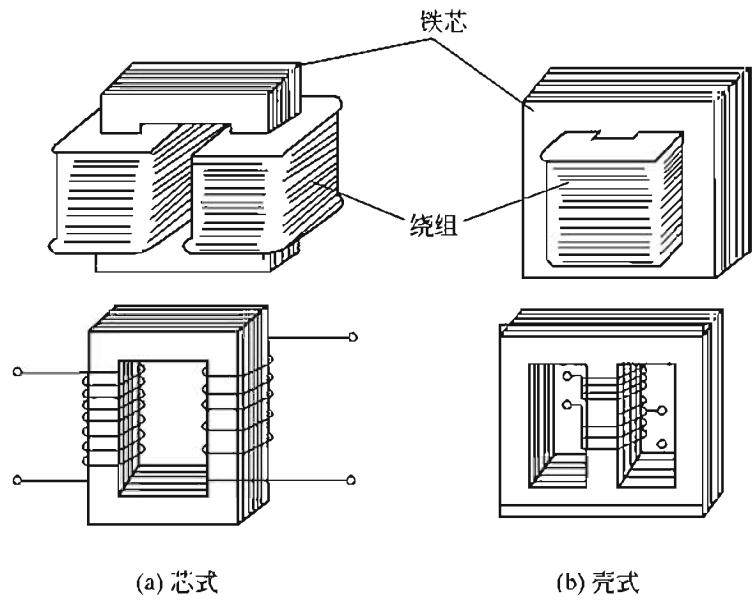


图 3-3 变压器铁芯基本类型

4. 芯式铁芯主要结构形式

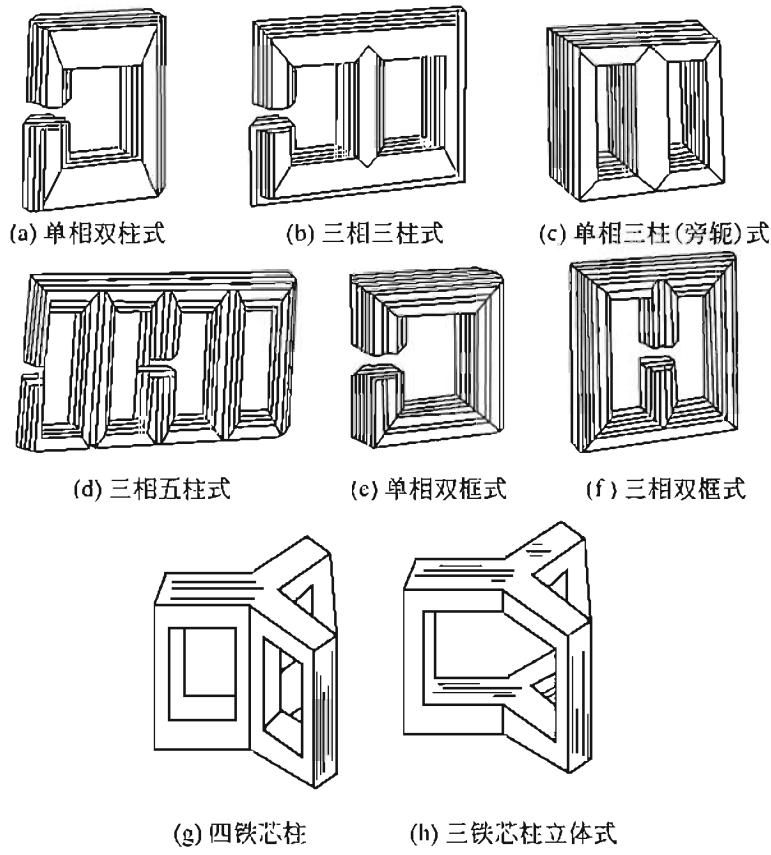


图 3-4 芯式铁芯主要结构形式

芯式铁芯结构是我国变压器制造厂普遍采用的铁芯结构形式。有下列优点：

① 铁芯可叠装成形，然后在铁芯柱上套装已绕好的绕组。

② 绕组为圆形，绕制方便。芯式铁芯分为单相双柱、单相三柱、三相三柱、三相五柱、四铁芯柱、三铁芯柱立体式（如图 3-4 所示）。选择铁芯结构时，主要考虑使空载电流和空载损耗小，噪声低，电压波形为正弦波。

5. 铁芯柱的各种截面形状

铁芯的柱面在容量较小的变压器中一般做成方形或长方形。当容量稍大时为了节省材料和充分利用空间，铁芯柱的截面可做成外接圆的十字形截面〔见图 3-5 (b)〕，变压器容量再增大，可做成外接圆的多级阶梯形截面〔见图 3-5 (c)〕。

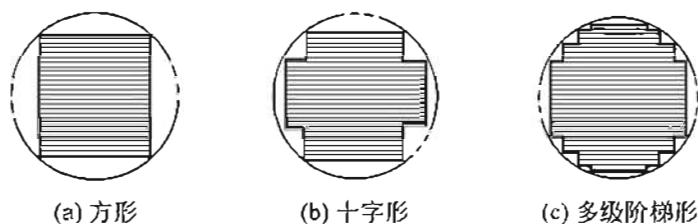


图 3-5 铁芯柱的各种截面形状

6. 铁芯的油道设置

为了使变压器铁芯中发出的热量能被绝缘油在循环时充分带走，从而达到良好的冷却效果，必须在较大直径的铁芯中设置油道（见图 3-6）。油道方向与硅钢片平行的称平行油道，油道方向与硅钢片垂直的称为垂直油道。垂直油道的散热效果比平行油道好，但铁芯的结构相对要复杂。

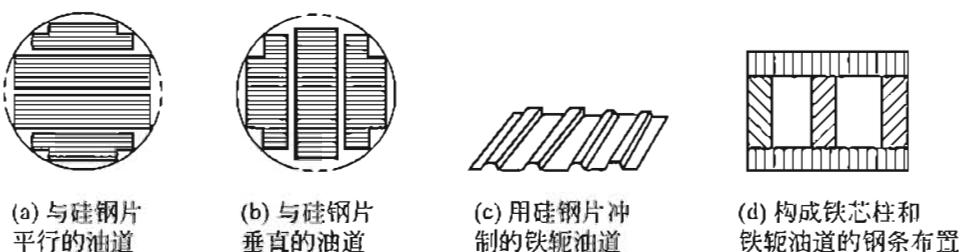


图 3-6 铁芯的油道设置

7. 芯柱与铁轭的叠片形式

铁芯的叠片形式按芯柱和铁轭的接缝是否在一个平面内进行分类。各接合处的接缝在同一垂直平面内的称为对接；接缝在两个或多个垂直平面内的称为搭接。

对接式的芯柱片与铁轭片间可能短路，需垫绝缘垫，且在机械上没有联系，夹

紧结构的可靠性要求高。因此，变压器铁芯大多不采用对接叠片形式。搭接式的芯柱片与铁轭片的一部分交替地搭接在一起，使接缝交替遮盖，避免了对接式的缺点。叠片铁芯大多采用 45° 斜接缝交替搭接形式。芯柱与铁轭的叠片形式如图3-7所示。

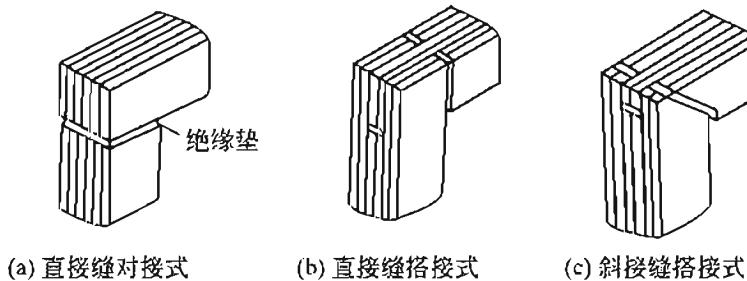


图3-7 芯柱与铁轭的叠片形式

8. 小型单相变压器常用铁芯型式

小型单相变压器常用铁芯有E字形、日字形、F字形、C字形，如图3-8所示。

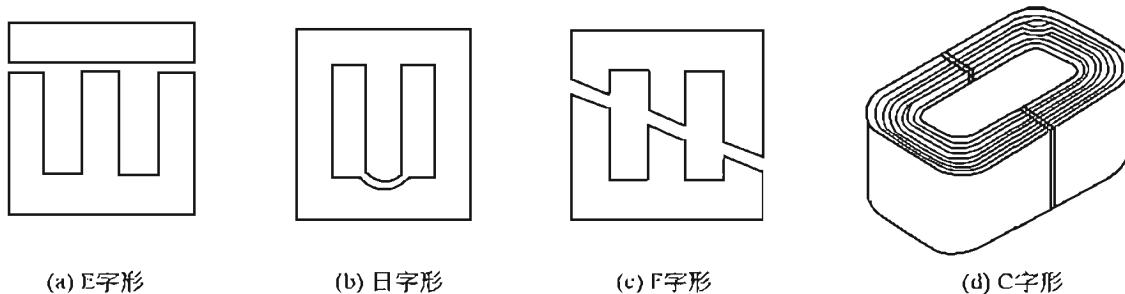


图3-8 小型单相变压器常用铁芯型式

9. 单相芯式变压器铁芯和绕组

单相两铁芯柱有两个铁芯柱，用上、下两个铁轭将芯柱连接起来，构成磁路。将绕

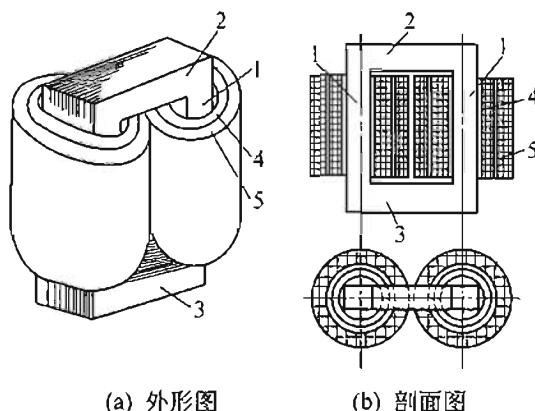


图3-9 单相芯式变压器铁芯和绕组

1—铁芯柱；2—上铁轭；3—下铁轭；4—低压绕组；5—高压绕组

组分别放在两个铁芯柱上，这两个铁芯柱上的绕组可接成串联或并联。通常将低压组放在内侧，高压组放在外侧，有便于绝缘设置和处理绕组的分接头（见图 3-9）。

10. 三相三芯柱变压器的铁芯和绕组

三相三芯柱变压器是将三相的三个绕组分别放在三个铁芯柱上，三个铁芯柱由上、下两个铁轭连接起来，构成磁回路。低压组放在内侧，高压组放在外侧（见图 3-10）。

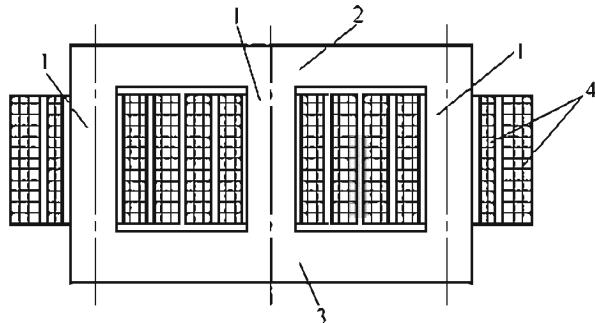


图 3-10 三相三芯柱变压器的铁芯和绕组
1—铁芯柱；2—上铁轭；3—下铁轭；4—高低压绕组

11. 三相五芯柱变压器的铁芯和绕组

三相五芯柱变压器是将各电压级的绕组分别按相套在中间三个铁芯柱上，旁轭是空的铁芯柱，没有绕组（见图 3-11）。

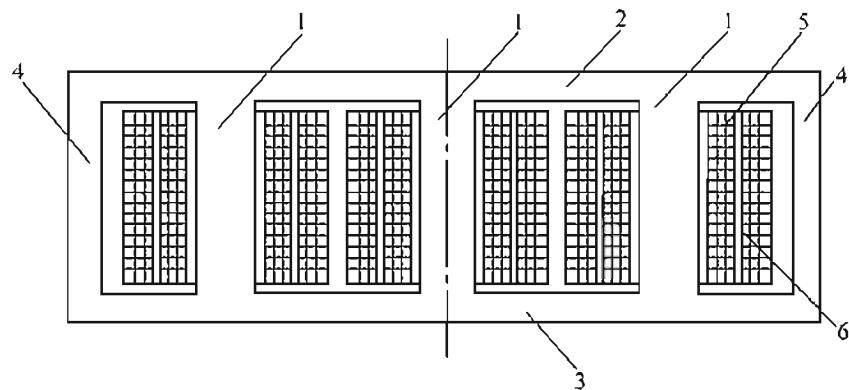


图 3-11 三相五芯柱变压器的铁芯和绕组
1—铁芯柱；2—上铁轭；3—下铁轭；4—旁轭；5—低压绕组；6—高压绕组

12. 单相壳式变压器的铁芯和绕组

单相壳式变压器铁芯结构如图 3-12 所示。具有两个分支铁芯柱 2，中间一个铁

芯柱的宽度为两个分支铁芯柱宽度之和。把全部绕组放在中间的铁芯柱上，两个分支铁芯柱围绕在绕组的外侧，好像“外壳”，故称为壳式变压器。

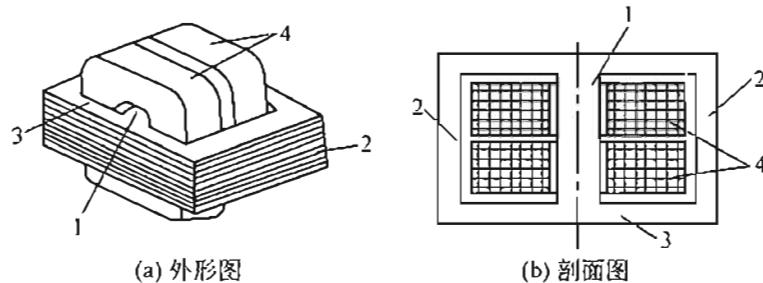


图 3-12 单相壳式变压器铁芯结构
1—铁芯柱；2—分支铁芯柱；3—铁轭；4—绕组

13. 三相壳式变压器的铁芯和绕组

图 3-13 为三相壳式变压器的铁芯和绕组，可看作是由三个独立的单相壳式变压器并排组成。

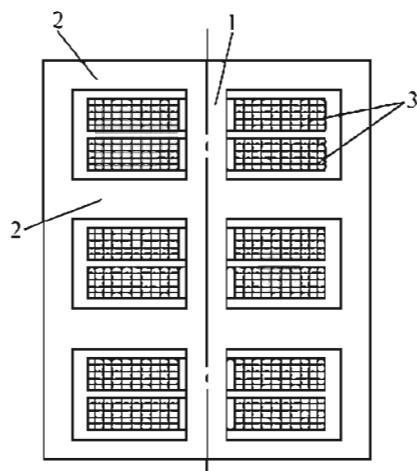


图 3-13 三相壳式变压器的铁芯和绕组
1—铁芯柱；2—分支铁芯柱；3—绕组

14. 变压器铁芯的夹紧结构

(1) 芯式三相三柱式变压器铁芯无孔绑扎、拉螺杆夹紧结构（见图 3-14）

无孔绑扎、拉螺杆夹紧结构常用于 $10\text{kV}\cdot\text{A}$ 、 $35\text{kV}\cdot\text{A}$ 及 $6300\text{kV}\cdot\text{A}$ 及以下的中小型变压器铁芯上，铁芯直径范围 $\phi 80\sim 400\text{mm}$ 。此结构往往又采用经吊螺杆连箱盖的安装方式、铁芯绑扎用树脂浸渍玻璃纤维绑扎带。环氧树脂玻璃绑扎带的固化处理，一般用烘干炉在 $105\sim 120^\circ\text{C}$ 干燥 $8\sim 12\text{h}$ 即可。若采用半干粘带绑扎

时，可用电烙铁封头，待套装线圈后，同器身一起入炉烘干。冷固化环氧树脂粘带，在0~20℃室内24~48h可基本固化，不用入炉。

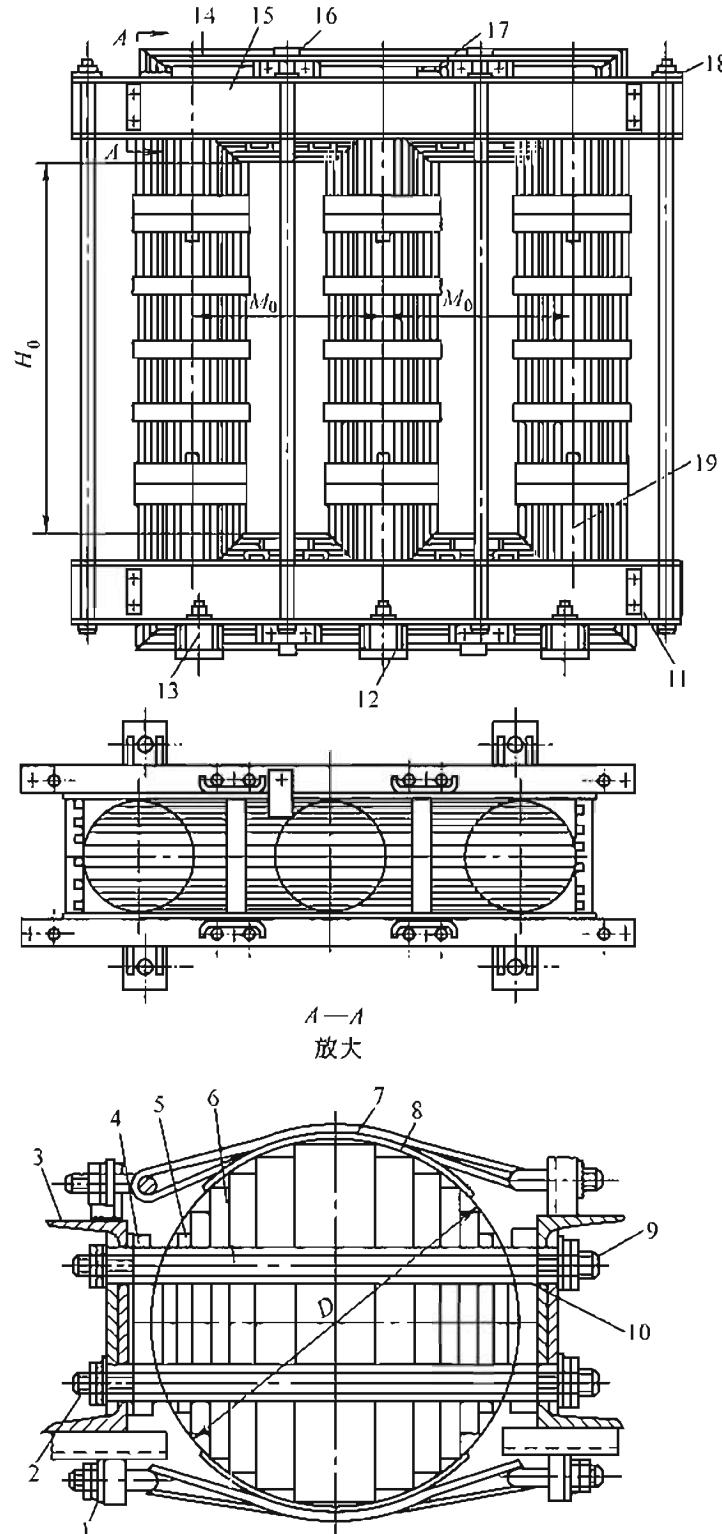


图3-14 芯式三相三柱式变压器铁芯无孔绑扎、拉螺杆夹紧结构

1—U形螺杆和螺母；2—螺母；3,15—上夹件；4—铁轭绝缘；5—铁轭；6—旁螺杆；7—纸板；
8—拉带；9—夹紧螺杆；10—绝缘管；11—下夹件；12—垫脚和绝缘；13—木垫块；14—铁芯；
16—拉带及U形螺杆；17—接地片及螺栓；18—拉螺杆；19—夹板

(2) 无孔绑扎、拉板夹紧铁芯结构 (见图 3-15)

无孔绑扎、拉板夹紧结构常用于 35kV 级以上的变压器铁芯上。铁芯直径范围：三相三柱式为 $\phi 400 \sim 900\text{mm}$ 、三相五柱式一般大于 $\phi 700\text{mm}$ 。此结构采用固定在箱底的安装方式。

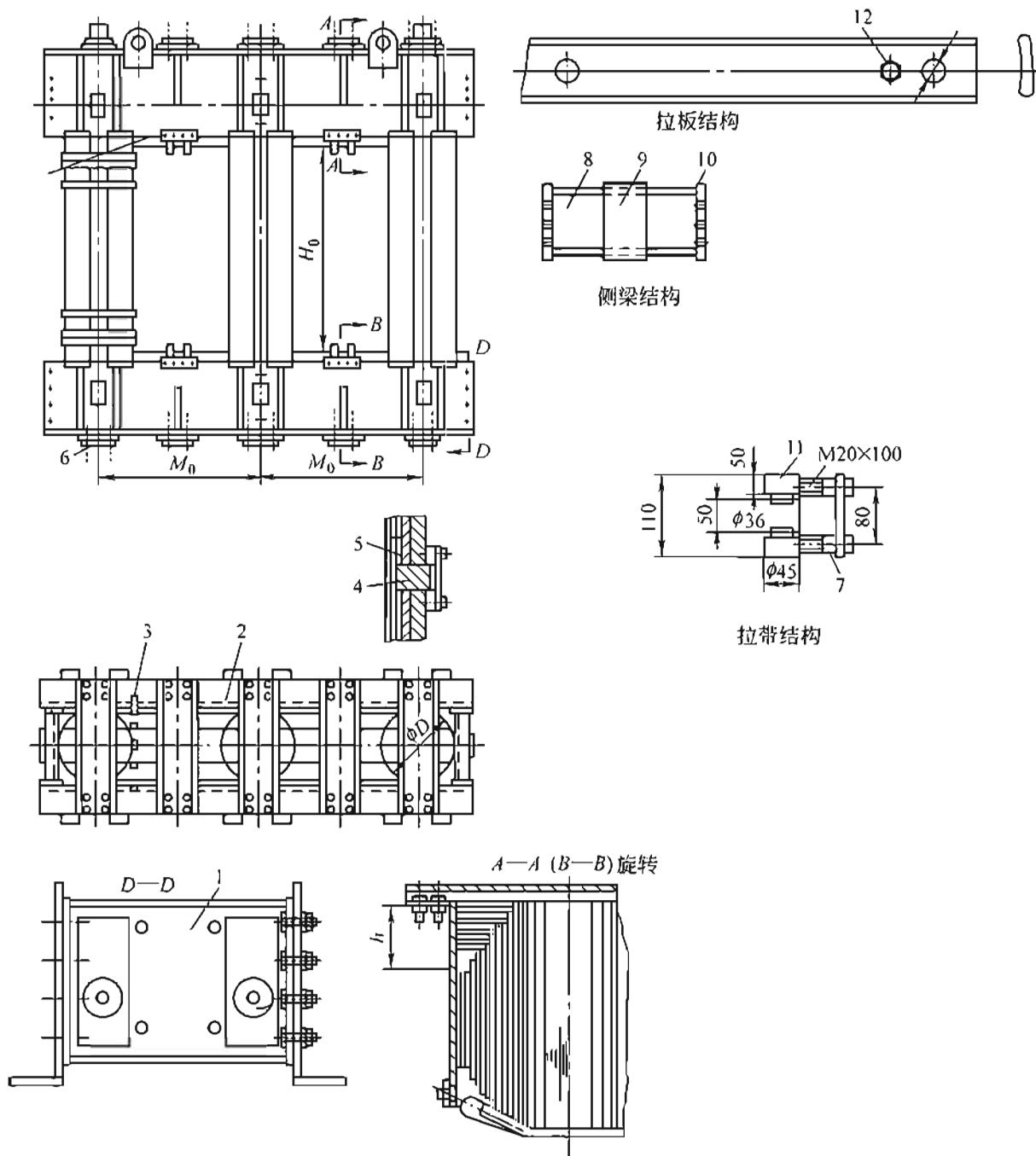


图 3-15 无孔绑扎、拉板夹紧铁芯结构

1—侧梁；2—夹件绝缘；3—接地片装配；4—拉板销子；5—拉板；6—垫脚纸槽；
7—拉带结构；8—弯板；9—加强板；10—固定板；11—轴；12—工艺孔

(3) 有孔铁轭螺杆、旁螺杆夹紧铁芯结构 (见图 3-16)

有孔铁轭螺杆、旁螺杆(或方铁)夹紧铁芯结构，根据铁芯大小可分为两种，

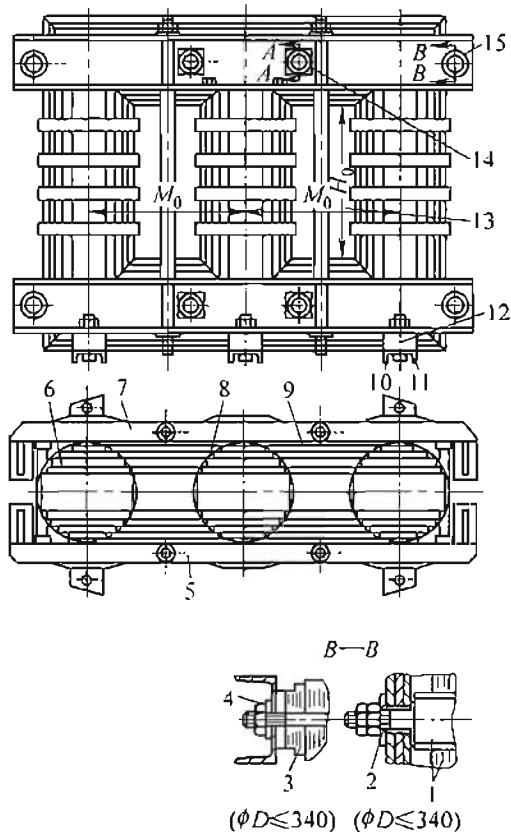


图 3-16 有孔铁轭螺杆、旁螺杆夹紧铁芯结构

1—一方铁及绝缘；2,4—钢垫圈；3—旁螺杆；5—高压侧夹件；6—铁芯；7—低压侧夹件；
8—接地片；9—夹件绝缘；10—垫脚；11—垫脚绝缘；12—木垫块；13—拉螺杆；
14—铁轭螺杆；15—旁螺杆或方铁

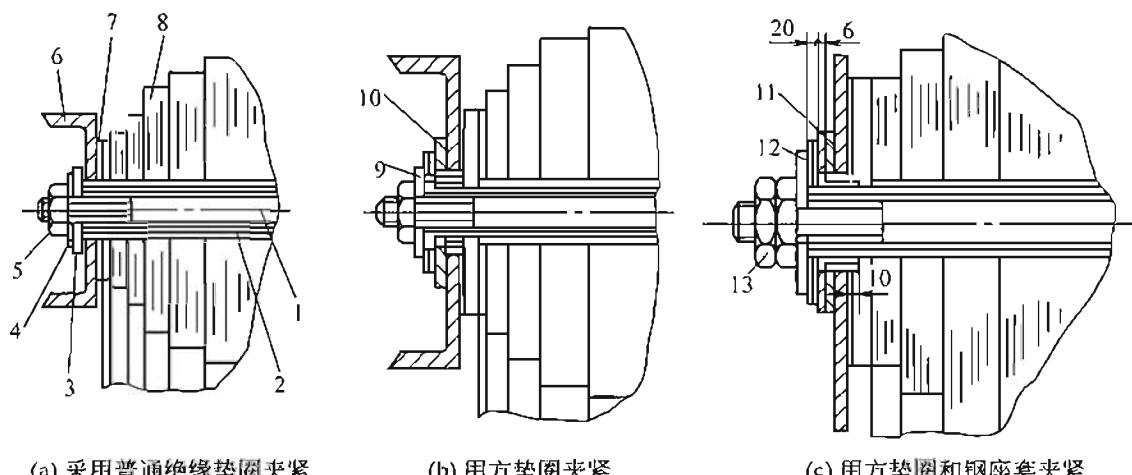


图 3-17 铁轭螺杆结构

1—螺杆；2—酚醛纸管；3—绝缘垫圈；4—钢垫圈；5—螺母；6—夹件；7—夹件绝缘；
8—铁轭；9—酚醛护管；10,11—一方垫圈；12—钢座套；13—锁紧螺母

即有孔铁轭螺杆夹紧、旁螺杆加拉螺杆的结构（铁芯直径小于或等于340mm）和有孔铁轭螺杆夹紧、方铁（内侧梁）无拉板的结构（铁芯直径大于340mm）。

（4）铁轭螺杆结构（见图3-17）

小型铁芯两端放置旁螺杆，铁轭的夹紧主要借助铁轭螺杆的夹紧。图3-17中铁轭螺杆的绝缘结构有三种：芯柱为 $\phi 80\sim 210$ mm时，可用酚醛纸管；芯柱直径较大时，用玻璃布管，以承受线圈的轴向力，否则增加方垫圈，以增加夹件腹板的厚度；如还不够，应增设钢座套（钢座套与铁轭片的距离应保持10mm左右）。

15. 变压器铁芯接地方式

变压器运行时，铁芯及固定铁芯的金属构件处在强电场中，在电场作用下，具有很高的对地电位，如果铁芯不接地，势必与接地的油箱及夹件间有较高的电位差存在，从而导致放电现象，造成变压器事故。为防止放电，铁芯及其金属构件必须可靠接地。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，当磁通穿过此闭合回路时，就会产生循环电流，造成铁芯局部发热，这是不允许的。所以只允许铁芯一点接地。

遵循铁芯一点接地的原则，对不同夹紧结构的铁芯，采用不同的接地结构，图3-18是四种典型的铁芯接地结构。

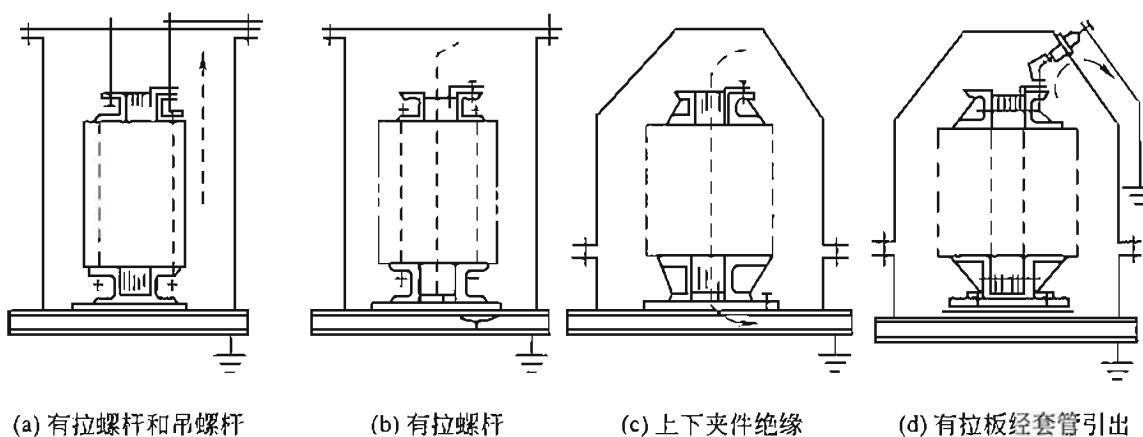


图3-18 变压器铁芯接地方式

16. 变压器绕组

绕组是变压器的电路部分，一般变压器都有一、二次绕组。和电源相连的绕组，即接受外加交流电能的线圈称为一次绕组。而与负载相连接的绕组，即向外输出电能的线圈称为次级绕组。

根据绕制方式不同，变压器的绕组可分为层式绕组、连续式绕组、螺旋式绕组及箔式绕组，如图 3-19 所示。

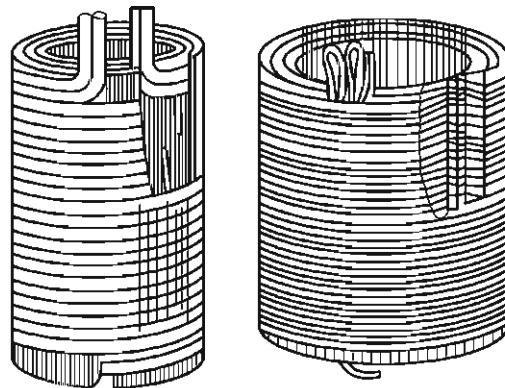
(1) 层式绕组

主要用于中小型变压器及大型变压器的调压绕组。可用单根导线绕制，也可用多根扁导线并联绕制。可制成单层、双层或多层筒式。层间设置绝缘纸或油道取决于层间电压大小及绕组散热情况。

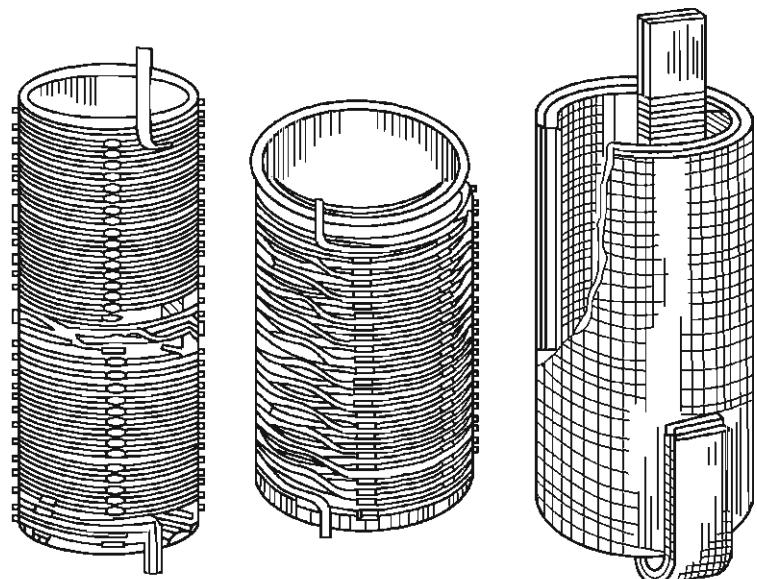
(2) 连续式绕组

由纸包扁线绕制的若干线饼组成，每个线饼由几个线匝按顺序连续绕制。连续式绕组机械强度高、散热好、能适应容量和电压要求，但绕制工艺较复杂，外观看来连线较多。

(3) 螺旋式绕组



(a) 双层层式 (b) 多层层式



(c) 连续式 (d) 螺旋式 (e) 箔式

图 3-19 变压器绕组

可单根或多根导线并绕，在匝与匝之间留有空隙，在空隙间加以垫块，构成绕组的径向油道。螺旋式绕组绕制简单，冷却条件好，如绕组匝数多就不适用。一般用于三相容量 $630\text{kV}\cdot\text{A}$ 以上、电压为 35kV 及以下的大电流绕组和有载调压变压器的调压绕组。

(4) 箔式绕组

是用铝箔或铜箔作为导体的绕组。箔式结构是由一层导体箔、一层薄绝缘相间，均匀紧密绕制而成。层间导体接触面大而间距小，承受短路能力强。

17. 交叠式绕组

交叠绕组是将高、低压线圈绕成饼状，沿铁芯轴向交叠放置，一般两端靠近铁轭处放置低压绕组，有利于绝缘。此种绕组大多用于壳式、干式变压器及电炉变压器（见图 3-20）。

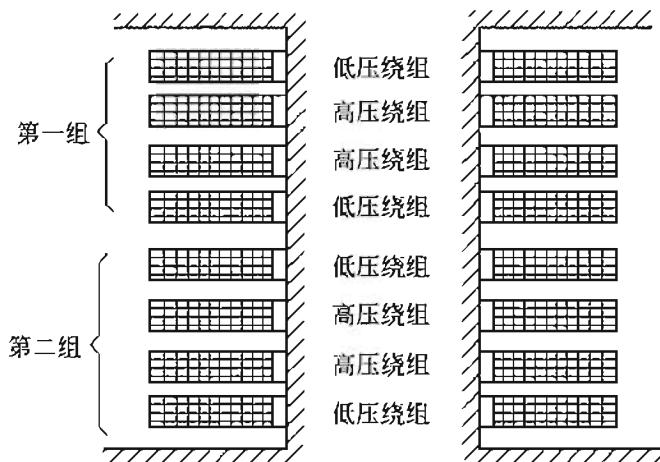


图 3-20 交叠式绕组

18. 低压层式绕组出线头绝缘包扎

低压层式绕组出线头绝缘包扎用直纹布带将端绝缘绑扎在第一匝导线上，如图 3-21 所示。出线头弯折处与下一匝相邻处，垫 0.5mm 厚 ($50\text{kV}\cdot\text{A}$ 及以下垫 0.2mm 厚) 的绝缘纸槽，长约 $60\sim 80\text{mm}$ 。在首匝和相邻匝之间垫 1mm 厚的绝缘纸垫条，此垫条与导线一起弯折，并伸出线圈绝缘 50mm ，外绕布带扎紧（导线厚度小于 3.8mm 时，可用 0.12mm 的电缆纸半叠包，包至伸出端 50mm 处）。如果端绝缘是电木筒制成的，则沿圆周用布带作 $4\sim 5$ 次将线匝拉紧后，压在导线下面。在开始绕第一匝时，要把布带翻到导线的上面来。绕第二匝时，再将布带放到导线下面去，随着绕制将布带拉紧，用线匝压住。

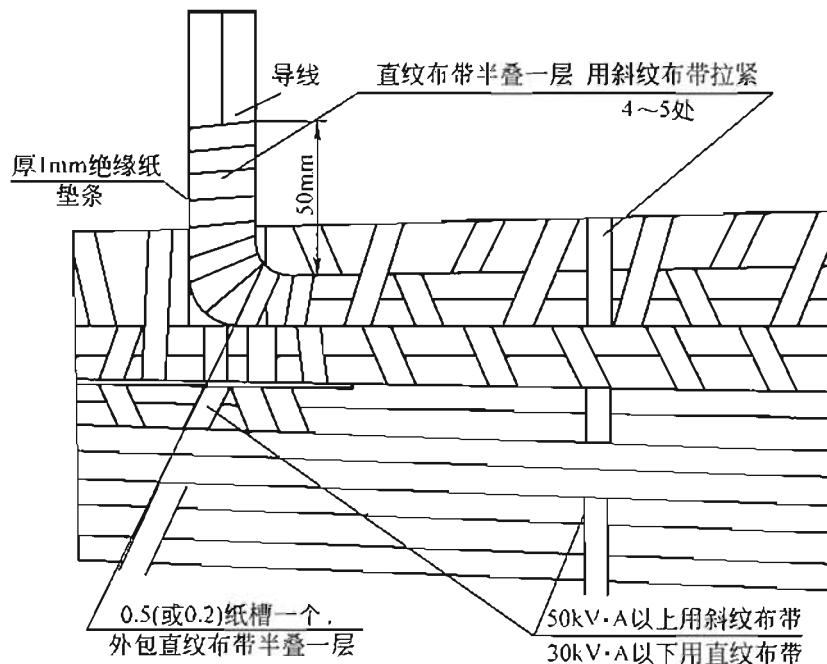


图 3-21 低压层式绕组出线头绝缘包扎

19. 连续式线圈出头包扎

10kV 及以下连续式高压线圈引出头均用厚 0.5mm 绝缘纸槽，分别放在出头端弯折处和线段上，外用 0.25mm 厚的白布带包扎，如图 3-22 所示。

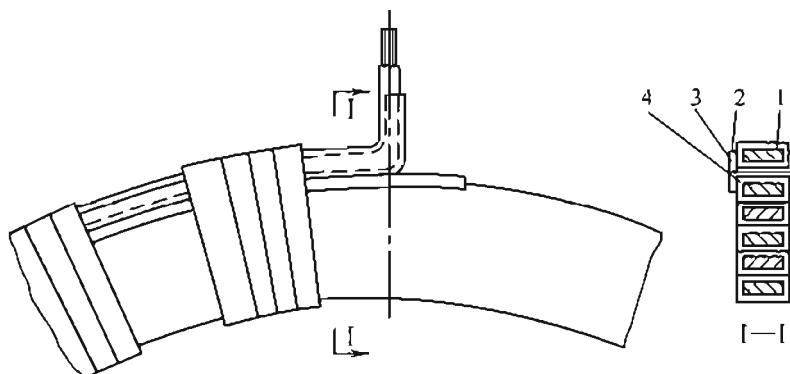


图 3-22 连续式线圈出头包扎

1—引出线匝的导线；2—绝缘纸槽 $0.5 \times 120\text{mm}$ ；3—绝缘纸槽 $0.5 \times 200\text{mm}$ ；4—线匝

20. 螺旋式线圈端部包扎图

电压约为 6~10kV 的大型变压器的大电流低压线圈采用螺旋式线圈，电流特别大时采用双螺旋式线圈，如图 3-23 所示。螺旋式线圈是每匝沿着轴线方向，一匝跟着一匝绕，一般每匝由数根并绕导线组成，在相邻匝间有径向油道。

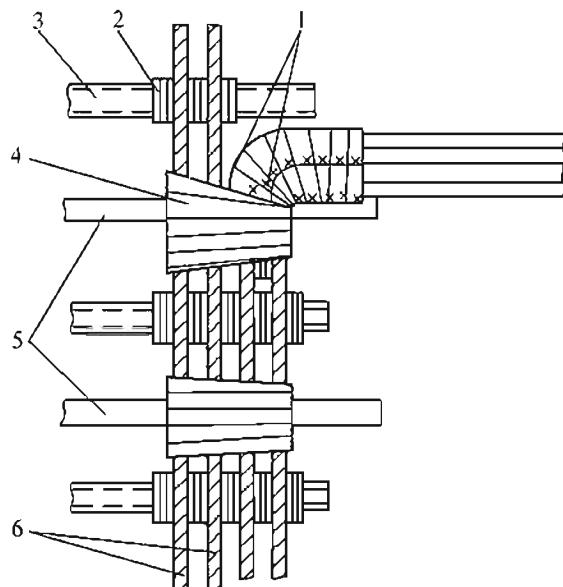


图 3-23 螺旋式线圈端部包扎图

1—附加垫块；2—平尾垫块；3—撑条；4—布带扎紧；5—绕线临时撑条；6—线匝

21. 中型变压器的内部绝缘结构

变压器的绝缘主要分为内部绝缘（油箱内绝缘）和外部绝缘（空气中绝缘）两

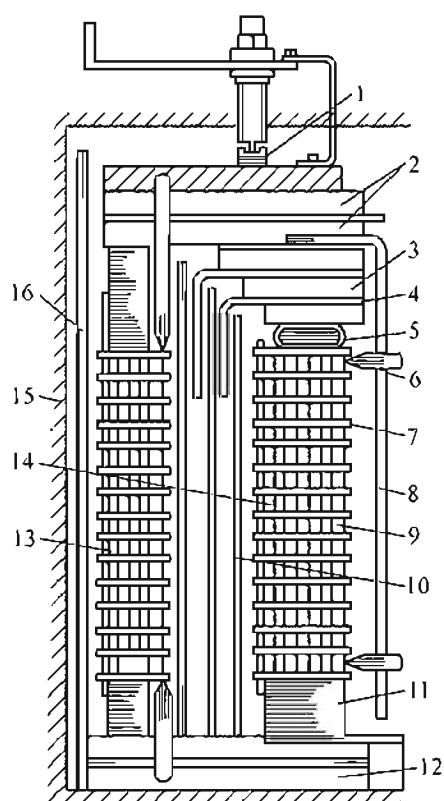


图 3-24 中型变压器的内部绝缘结构示例

1—压钉绝缘；2—上铁轭绝缘；3,11—绕组端绝缘（端圈）；4—角环；5—静电环；6—引线绝缘；
7—段间绝缘；8—相间隔板；9—匝间绝缘；10—绕组间绝缘（纸筒）；12—下铁轭；
13—低压试验；14—高压试验；15—铁芯；16—绕组铁芯间绝缘（纸筒）

类，图 3-24 是中型变压器的内部绝缘结构示例。

22. 变压器套管

变压器高、低压套管是变压器箱外的主要绝缘装置，大部分变压器绝缘套管的外部采用陶瓷制成，中间为导电杆。绝缘套管装在变压器油箱的顶盖上，导电杆的一端在油箱内部，分别与变压器的高、低压绕组的接线端点连接，在油箱外部的一端与外部电路相连。绕组电压等级越高，绝缘套管外形尺寸越大，结构也越复杂，高压侧绝缘套管与低压侧绝缘套管的结构与绝缘水平不同，不能任意对调使用。

图 3-25 (a) 为复合瓷绝缘式套管 (BF 型)，其额定电压在 1kV 及以下，额定电流 300~4000A。套管由上瓷套和下瓷套组成绝缘部分。上瓷套作为径向绝缘和空气侧轴向绝缘，下瓷套作为油侧或空气侧轴向绝缘。导电杆穿过瓷套的中心，并利用导杆下端焊接的定位件和上端的螺母将上下瓷套串压在变压器安装孔周围的箱盖上。

导电杆用来接通引出线，套管尾部引出线在电流为 1000A 及以下时，单路用螺母连接；当额定电流在 1200~4000A 时，引出线连成双路。瓷管外部引出线的连接在额定为 600A 及以下时，采用螺母直接连接；当额定电流为 800A 及以上时引出线采用接线头、螺栓、螺母和外部母线连接。

单体瓷绝缘式套管为导杆式 (BD 型) 和穿缆式 (BDL 型)，图 3-25 (b) 为穿缆式结构，有一个瓷套，瓷套中部有固定台，以便用压钉卡装在变压器箱盖上。穿缆式套管上部有一固定槽，而穿杆式套管下部有一固定槽，以便在连接引线时不转动。

图 3-25 (c) 为充油式套管，目前基本不采用。

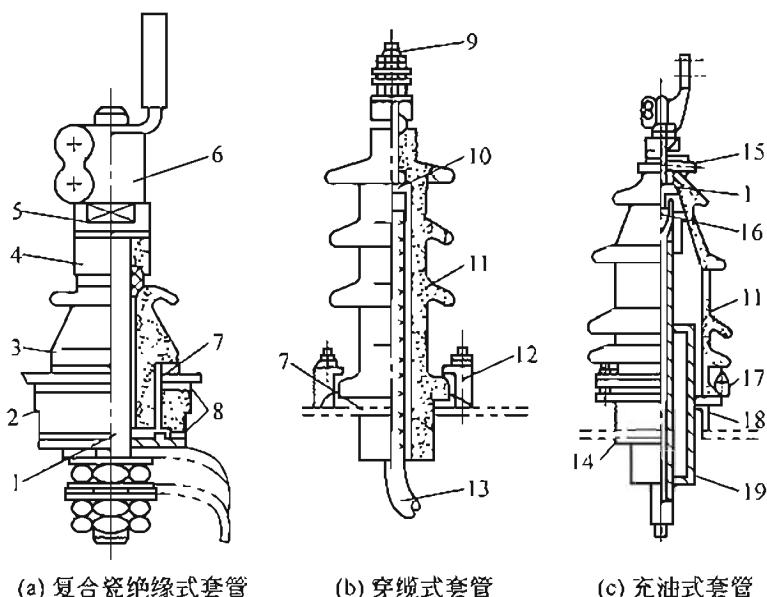


图 3-25 变压器套管

1—导杆；2—下瓷套；3—上瓷套；4—瓷盖；5—螺母和衬垫；6—接线头；7—密封垫圈；

8—纸垫圈；9—电缆接头；10—衬垫；11—瓷套；12—压钉；13—电缆；14—均压环；

15—放气塞；16—引线接头；17—压圈；18—升高座；19—绝缘筒

23. 有附加绝缘的瓷套管

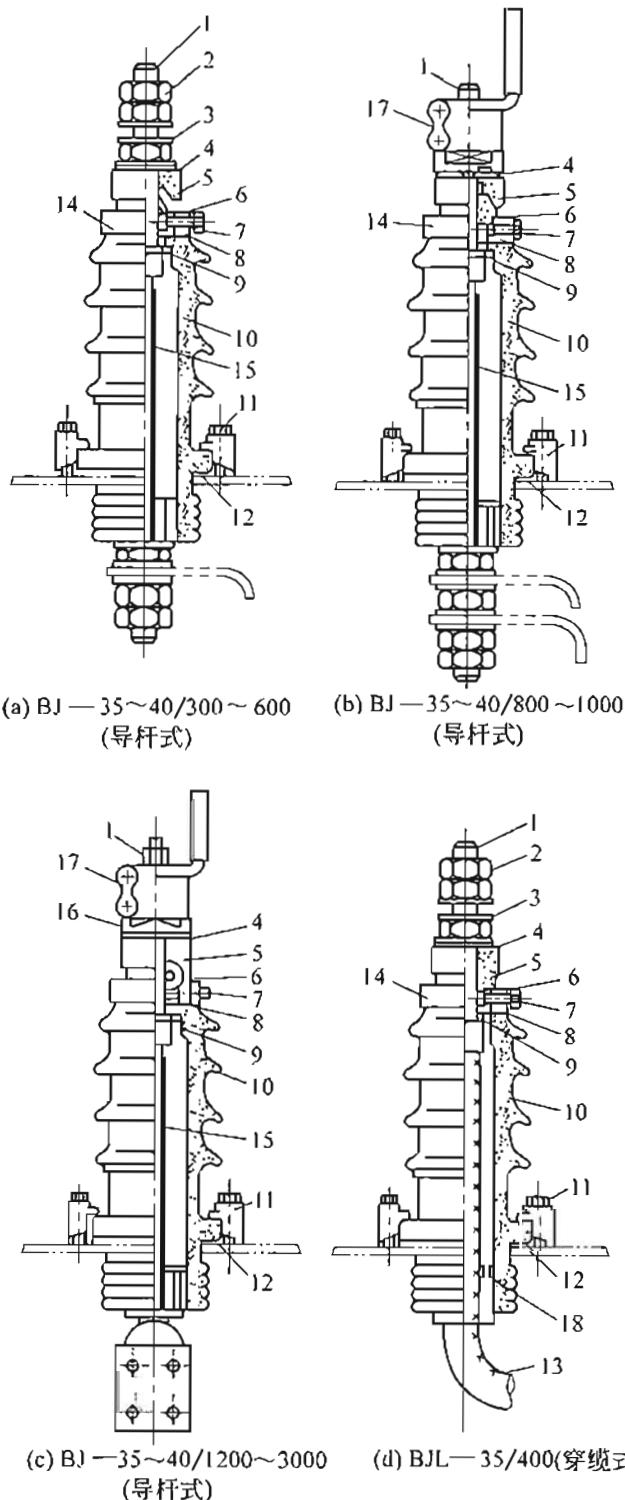


图 3-26 有附加绝缘的瓷套管

1—导电杆；2—螺母；3—垫圈；4—衬垫；5—瓷盖；6—密封环；7—放气塞；8—密封垫圈；
 9—衬垫；10—瓷管；11—压钉；12—密封垫圈；13—加强绝缘的电缆；14—罩；
 15—绝缘管；16—圆螺母；17—接线头；18—绝缘环

有附加绝缘的套管是单体绝缘式套管上增加绝缘而形成的（见图 3-26）。由于单体绝缘式套管的径向电场不均匀，瓷套的介电系数大，而空气或变压器油介电系数小，电位主要分布在空气或变压器油上。为了改善电位的分布，需在导电杆外面套有绝缘管或在电缆上包以 3~4mm 厚的绝缘纸加强绝缘，以用于 35kV 和 40kV 的电压等级中。在用于 40kV 电压等级的套管，其下部一个瓷伞至安装固定台之间的瓷套外表面涂以半导体漆（含有锌粉或铝粉），以改善接地处的电场。

24. 桶式油箱基本结构形式

大容量变压器将器身放在油中的变压器称为油浸式变压器，通过油的循环使器身降温及对器身带电部分绝缘，这是因为变压器油的绝缘性能比空气好，从而缩小变压器尺寸。并且，油加热后可加速对流作用，有效改善散热条件。用于盛装变压器器身和变压器油的容器称为变压器油箱。根据变压器的容量与结构形式，变压器油箱可分为箱式和钟罩式两种基本形式。箱式油箱适用于中小容量的电力变压器。

图 3-27 是桶式油箱基本结构形式，小型变压器采用平盖，大型变压器采用梯形盖。有些产品，箱盖和箱沿之间不是用螺栓连接的，而在试验合格后用电焊焊接，有效解决箱沿处的渗漏油问题。这种变压器不考虑内部检修，在变压器本体故障时给检修带来一些困难。

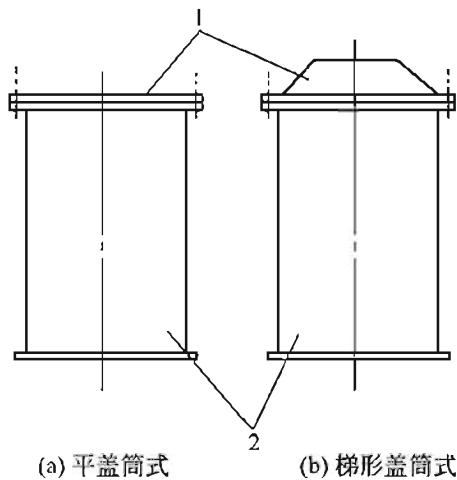


图 3-27 桶式油箱基本结构形式示意图

1—箱盖；2—油箱

25. S11 型变压器吊芯式油箱

图 3-28 为 S11 型变压器吊芯式油箱外形，常称筒式或桶式油箱或顶盖式油箱。一般用于容量为 6300kV·A 及以下的变压器，变压器安装或大修时需拆开检查时，必须将器身从箱内吊出。箱沿设在油箱顶部，箱盖和箱沿用螺栓相连。

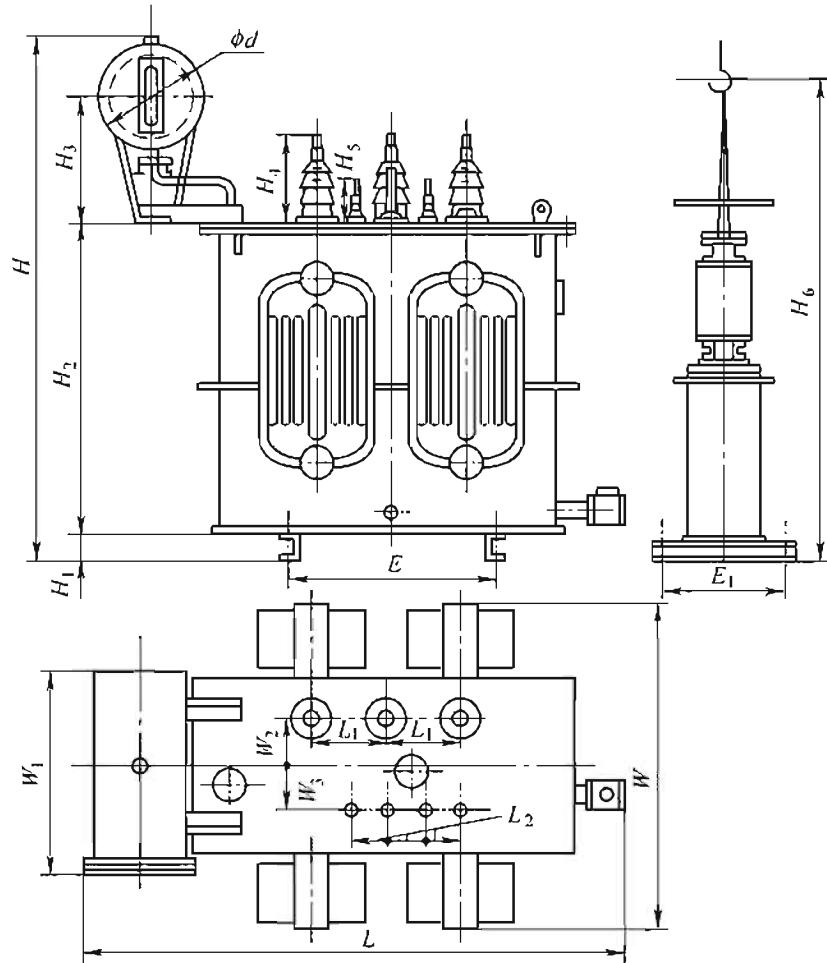


图 3-28 S11 型变压器吊芯式油箱外形

26. 钟罩式油箱基本结构形式

为了提高大型电力变压器的容量，便于运输与检修，产生了钟罩式油箱（见图3-29）。上、下节油箱结合处四周用法兰螺栓紧固，检修时只需将上节油箱吊起，整个器身便露出，可以进行检修。钟罩式箱壳上装有高、低压引线套管，分接开关操作手柄、油枕、安全气道、气体继电器及测温元件等，同时箱壳还要满足真空脱气，真空注油时的压力要求。因此，箱壳不但要求密封性好，还必须具有足够的机械强度。下节油箱需要承受整个变压器的重量。尤其在吊装、运输时，下节油箱更要求具有足够的机械强度。

钟罩式油箱可分为拱顶式油箱、平顶式油箱及梯形顶式油箱三种。拱顶式油箱和平顶式油箱一般用在电压等级在 110kV 以下的产品，根据近期国内产品的发展情况，平顶式油箱有取代拱顶式油箱的趋势。梯形顶式油箱基本都用于 220kV 及以上的产品。

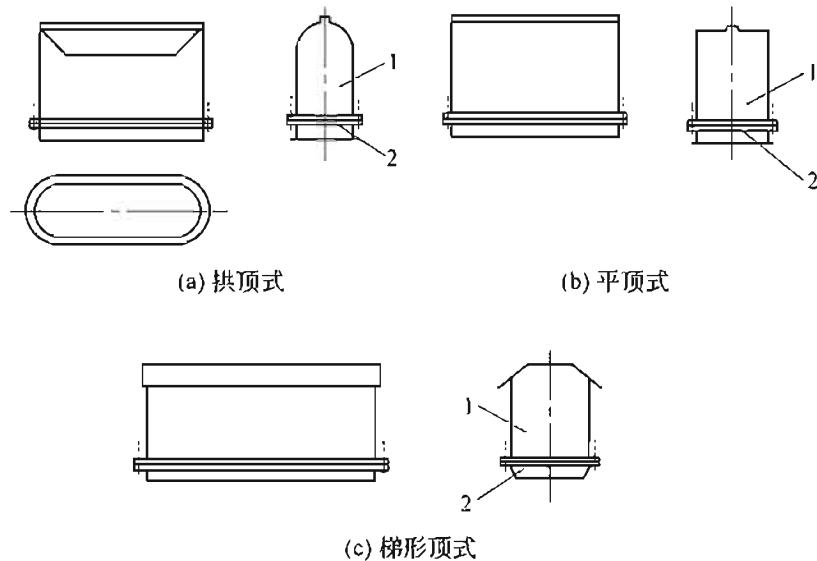


图 3-29 钟罩式油箱基本结构形式

1—上节油箱；2—下节油箱

27. 钟罩式油箱

容量在 $8000\text{kV}\cdot\text{A}$ 以上的大、中型电力变压器多采用钟罩式油箱（见图 3-30）。这种油箱的箱沿设在距箱底 $250\sim400\text{mm}$ 处，上节油箱为钟罩形，用螺栓将上、下油箱连接在一起，中间加密封条。

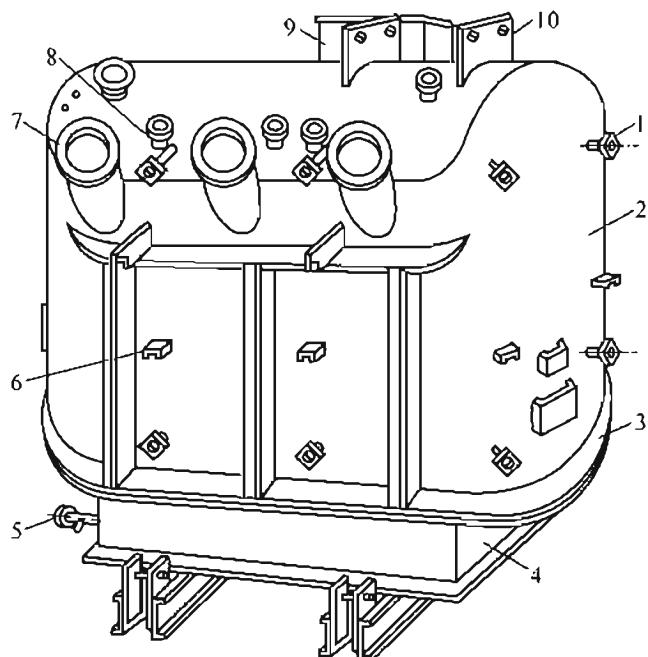


图 3-30 钟罩式油箱外形

1—散热器连管头；2—上节油箱；3—箱沿；4—下节油箱；5—放油阀门座；6—风扇装置支架；
7—高压套管升高座；8—分接开关座；9—低压套管升高座；10—储油柜支板

28. 分接开关原理

电网电压是随着运行方式和负载大小变化而变化的。电网电压过高或过低，直接影响用电设备的使用。为了保证变压器有额定输出电压，改变一次线圈分接抽头的位置即改变变压器线圈接入的匝数多少，可改变输出电压。在变压器一次侧的三相线圈中，根据不同匝数引出几个抽头，按照一定的接线方式接在分接开关上，如图 3-31 所示。开关的中心有一个能转动的触头，当需要调整变压器电压时，改变分接开关的位置即改变了变压器的变压比。

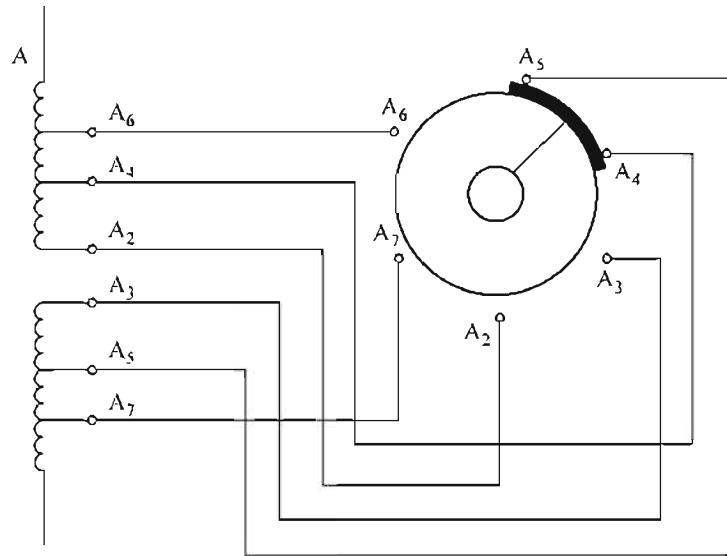


图 3-31 分接开关原理图

29. 配电变压器无励磁分接开关

分接开关是用来切换变压器的高压或低压绕组的分接头，以满足因网路电压变化需调整输出电压的要求。不带励磁切换分接头的开关称无励磁分接开关；在网路上带负载切换的开关称有载分接开关。无励磁分接开关又称无载分接开关，是在变压器一、二次侧均与网路断开的情况下，用以变换一次或二次绕组的分接，改变其有效匝数，进行分级调压。为使开关小巧，开关一般都装在高压侧。在配电变压器中最常用的是三相中性点调压无励磁分接开关，按结构可分为中性点三相调压分接开关及中部调压分接开关。图 3-32 是三相中性点调压的无励磁分接开关的结构、外形和接线图。其中图 3-32 (a) 为老式开关，图 3-32 (b) 为新式开关，其主要区别在操作部分，前者用操动螺母，后者是用已折叠的手柄进行操作，操作后将手柄折叠到有缺口的新一挡位置。

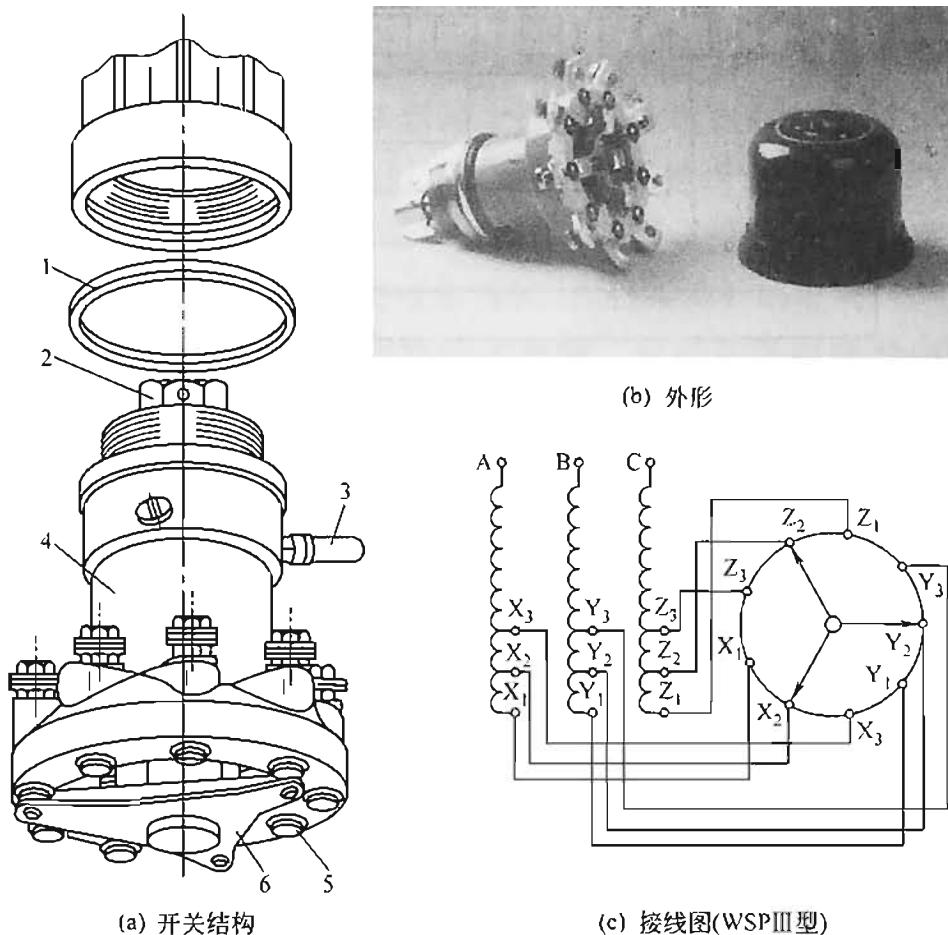


图 3-32 配电变压器无励磁分接开关

1—密封垫圈；2—操动螺母；3—定位钉；4—绝缘盘；5—静触头；6—动触头

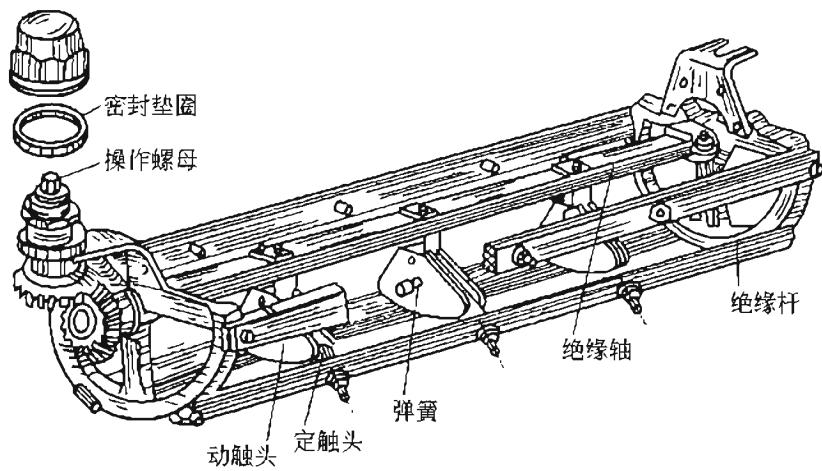
30. 三相中部调压无励磁开关

此种开关为半笼形水平放置夹片式结构，用在主变压器上（见图 3-33）。这种开关还有全笼形、立式、条形等多种结构。

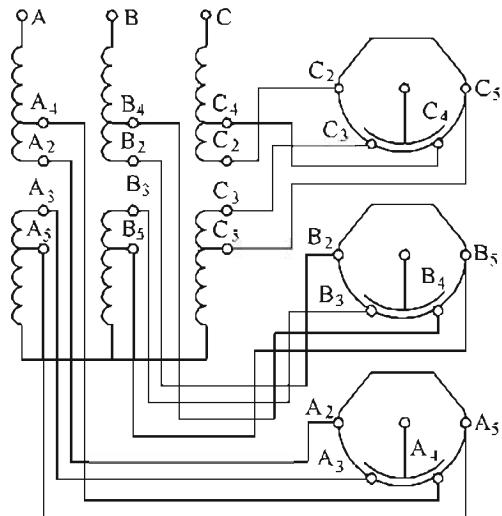
31. 管式冷却器

散热器是由装于变压器四周的散热管或散热片组成的。当变压器运行时，上层油温与下层油温产生温度差时，通过散热器促成油的循环对流，使变压器芯子周围的高温油通过散热器冷却后再到油箱内，起到降低变压器运行温度的作用。

当变压器容量增大时，简单的箱壳自然散热冷却不能满足要求，需采用散热管式散热，箱壳四周围焊许多散热管，如图 3-34 所示。管子的层数一般为 1~3 层，采用 $\phi 40\text{mm}$ 的有缝钢管压扁的扁管作为散热管。变压器运行时热油从散热管上端



(a) 外形(WSL II型)



(b) 接线图

图 3-33 三相中部调压无励磁开关

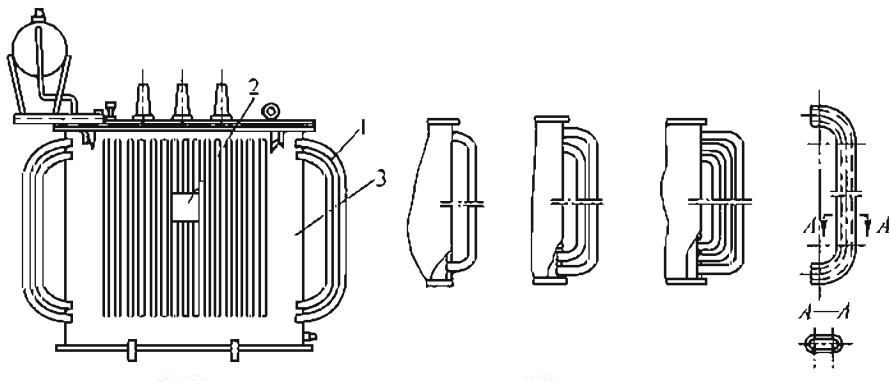


图 3-34 管式冷却器

1—固定扁管形散热管；2—铭牌；3—箱壳

进入，冷油由管的下端流入变压器底部，冷油使铁芯和绕组得到冷却，这样反复循环，使变压器得到冷却。

32. 波纹式油箱基本结构

波纹式油箱是在油箱箱壁的外侧焊上很多波纹栅，在凸起部分的对应箱壁上、下开有导油孔，波纹栅主要用来散热和调整变压器内部压力（见图 3-35）。波纹栅是由厚度为 1~2mm 的薄钢板折成，每个槽宽十几毫米，间距为 30~40mm，槽深 100~200mm。这种结构的油箱国外已普遍采用，国内也开始生产。

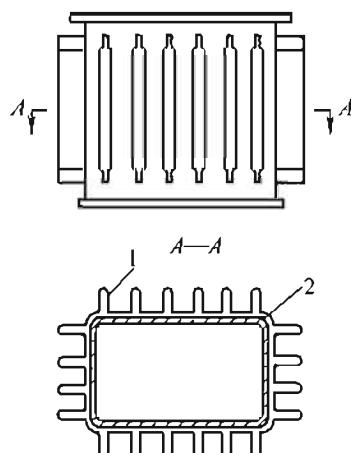


图 3-35 波纹式油箱基本结构示意图

1—波纹栅；2—油箱箱壁

33. 可拆型 (PC) 310 片式散热器结构

变压器运行时，铁芯、绕组和构件均会产生损耗，这些损耗转变成热量散发于周围介质中，从而引起变压器温度升高，使绝缘老化。为了限制温升，必须采用冷却措施。冷却装置有散热器和冷却器两种，不带强油循环的称为散热器，带强油循环的称为冷却器。散热器有两种，一种是自然冷却的，不带吹风装置；另一种是带有吹风冷却装置的，如风冷散热器。冷却器有强油风冷冷却器和强油水冷冷却器两种。

片式散热器是用 1mm 厚钢板的波形冲片，与上下集油盒或油管经焊接组成。焊接工艺要求高，机械强度较扁管或圆管差，但节油、质量轻。

小型变压器采用的散热片较少，直接焊在油箱壁上，称固定型，以 PG 型表示。较大变压器散热片通过法兰盘装在油箱壁上，称可拆式，以 PC 型表示（见图 3-36）。为了增强散热效果，也采用吹风冷却，分为侧吹式、底吹式和混合式三种。

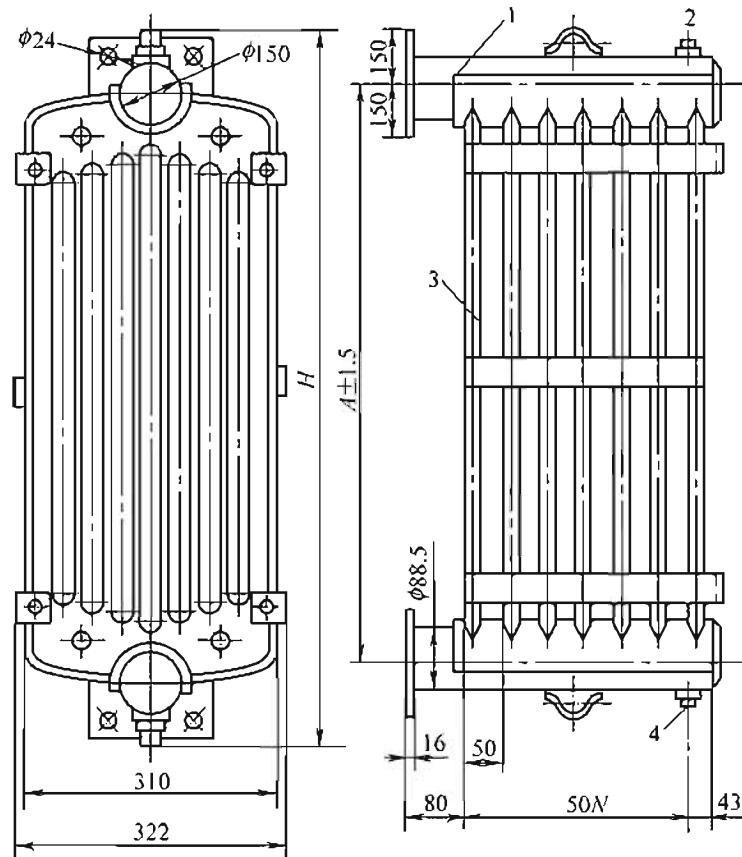


图 3-36 可拆型 (PC) 310 片式散热器结构

1—集油盒；2—放气塞；3—散热片；4—放油塞

34. 带吹风的散热器

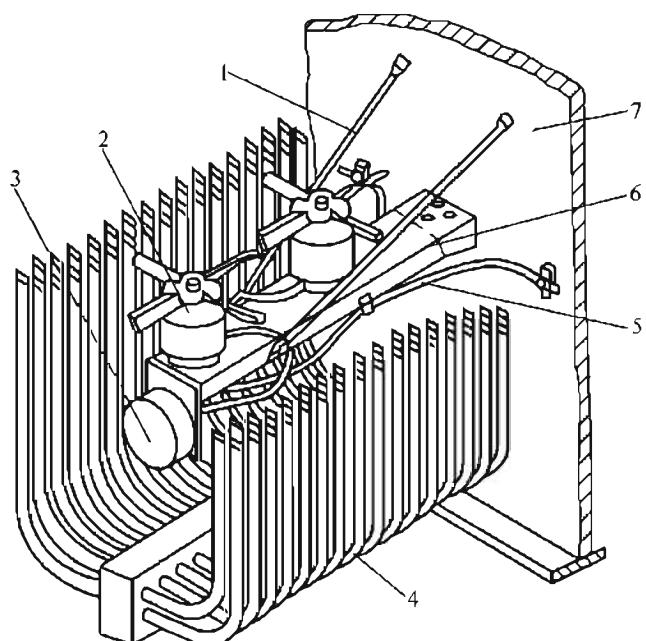


图 3-37 带吹风的散热器

1—拉杆；2—电动机和风扇；3—接线盒；4—散热管；5—电缆；6—支板；7—变压器油箱壁

在大、中型变压器的拆卸式散热器框内，可装上一个或多个冷却风扇，如图3-37所示。当散热管内热油循环时，依靠风扇吹风，使管内流动的热油加快冷却。

35. 防爆管

防爆管也叫安全气道，它位于变压器顶盖上，如图3-38所示。一端与箱体连接，另一端用防爆膜（玻璃薄膜或酚醛纸板）密封，上面有一小管和油枕上部连通。防爆管的作用是当变压器油箱内发生故障时，油被分解产生大量气体，使箱内压力骤增，若不迅速排除气体，有可能破損油箱。有了防爆管，油箱内压力剧增至一定数值时，管道上部出口处的一层玻璃薄膜或酚醛纸板破裂，使油气流迅速喷出，以保护油箱防止爆炸。上部小管是为了保证在正常运行情况下，防爆管上部空间气体压力和油枕上部平衡，避免玻璃膜松动造成气体继电器误动作，同时可以确保玻璃膜的密封。

但由于其爆破压力分散性较大，玻璃破碎后易掉入变压器内部很难取出，且修复时密封较困难，目前新产变压器已采用压力释放阀代替安全气道。

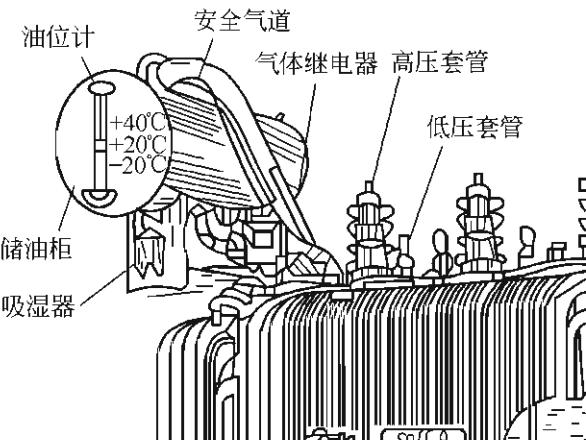


图 3-38 防爆管

36. 压力释放阀

压力释放阀是一种安全保护阀门，作为油箱防爆保护装置，可及时切断电源并避免油箱变形和爆裂（见图3-39）。

压力释放阀有一个金属膜盘，正常时受弹簧反压力作用紧压在阀座上。当油箱压力升高超过弹簧压力时，使膜盘顶起，变压器油在膜盘和阀座之间喷出，使油箱内部压力快速降低。当压力降到阀的关闭压力时，阀又可靠地关闭，有效防止外部空气、水分及其他杂质进入油箱，比安全气道动作精确、可靠，且动作后无零件破损，无需更换。

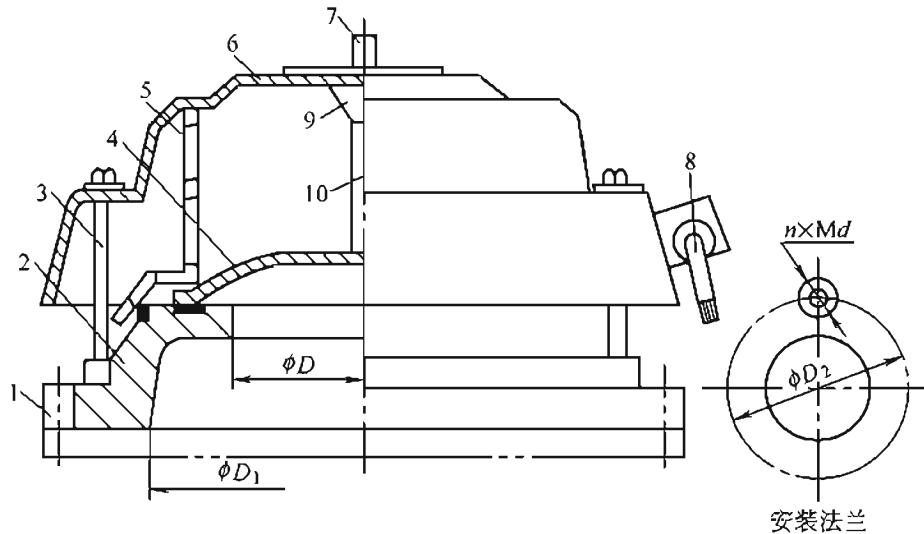


图 3-39 压力释放阀

1—安装法兰；2—阀座；3—螺杆；4—膜盘；5—弹簧；6—护罩；7—标志杆；
8—接线盒；9—胶套；10—轴

37. 储油柜

储油柜的作用：

- ① 调节油量；
- ② 防止油过快老化；
- ③ 防止气泡进入。

储油柜又叫油枕，装在变压器顶盖上用钢板制成的圆筒，内充以适量的油，与油箱连通。它的作用是当变压器运行负载变化时或周围环境温度变化，或当变压器油的体积随油温升高而膨胀时，油箱里的油充入油枕，而当油的体积因温度下降而收缩时，油枕里的油又流入油箱，油枕起着储油和补油的作用。还可减少变压器油与大气的接触面积，以防止变压器油的过快衰老和受潮，油枕上部可以补油，下部可以放出污秽油污。

小容量变压器不装油枕的原因是其外壳容积小，绝缘油在温度变化时胀缩量不多，箱内油不加满，低温时仍可保持足够的油位，而且空气通过呼吸器与油的接触面积也不大，不至于造成油的大量酸化和受潮。

储油柜的构造如图 3-40 所示。柜端的盖可拆卸，以便清洗。柜的端面装有油位计，以便在运行中监看油位的变化，油位指示处有三条温度线，油面标志线是在环境温度为 -30℃、20℃ 和 40℃ 且变压器无电状态下的油位线。它们应从储油柜内底部起算，分别在 0.2D (0.1~0.3D)、0.45D、0.6D 处划线。D 为储油柜内直径。玻璃油位计通过阀门与储油柜连通，如油位计需更换损坏的玻璃管时，可先

将阀门关闭，然后更换损坏的玻璃管，换好后再将阀门开通。在储油柜下方装有吸湿器。柜上标有变压器油号。

一般情况下气温变化为 $-30\sim40^{\circ}\text{C}$ 的范围，油顶层温升极限为 55°C （对密封式而言为 60°C ），油的温度变化为 125°C ，油的体积变化为 8.75% ，所以储油柜的容积是变压器油箱和散热器中油容积的 10% 。

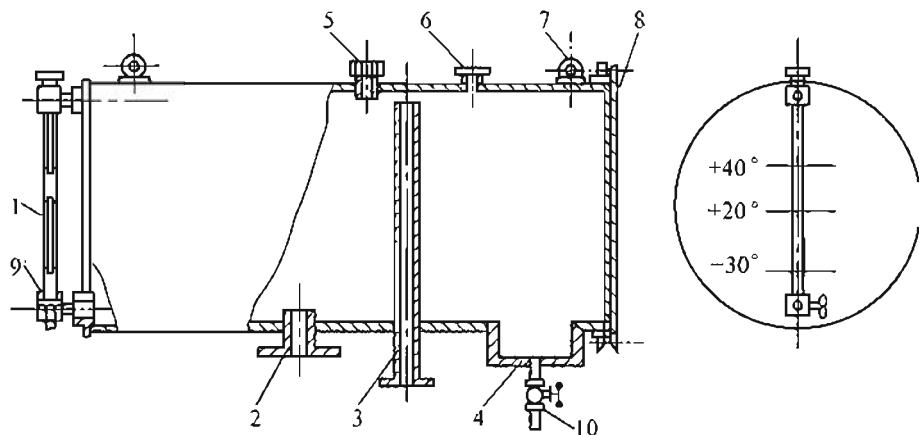


图 3-40 储油柜

1—油位计；2—气体继电器连通管；3—吸湿器连通管；4—集污盒；5—注油孔；
6—与安全气道连通的法兰；7—吊攀；8—端盖；9,10—阀门

38. 隔膜式储油柜

隔膜式储油柜的隔膜周边压装在上下柜沿之间，下侧贴在油面上，上侧和大气相接触，聚集在膜外的凝露水通过放水塞排出。具体结构见图 3-41。

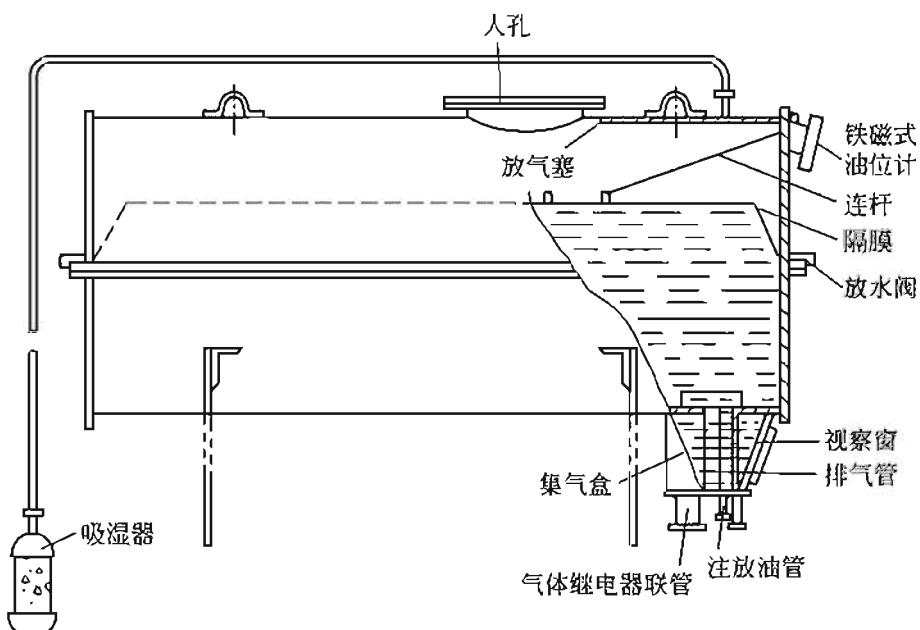


图 3-41 隔膜式储油柜结构

39. 胶囊式储油柜

大型油浸变压器的油枕还需常用胶囊密封，例如 8000kV·A 及以上容量较大的油浸变压器，为了防止油与空气接触而吸收潮气和氧化，影响其绝缘性能，所以在油枕中加装胶囊隔膜使变压器油与空气隔离（见图 3-42）。

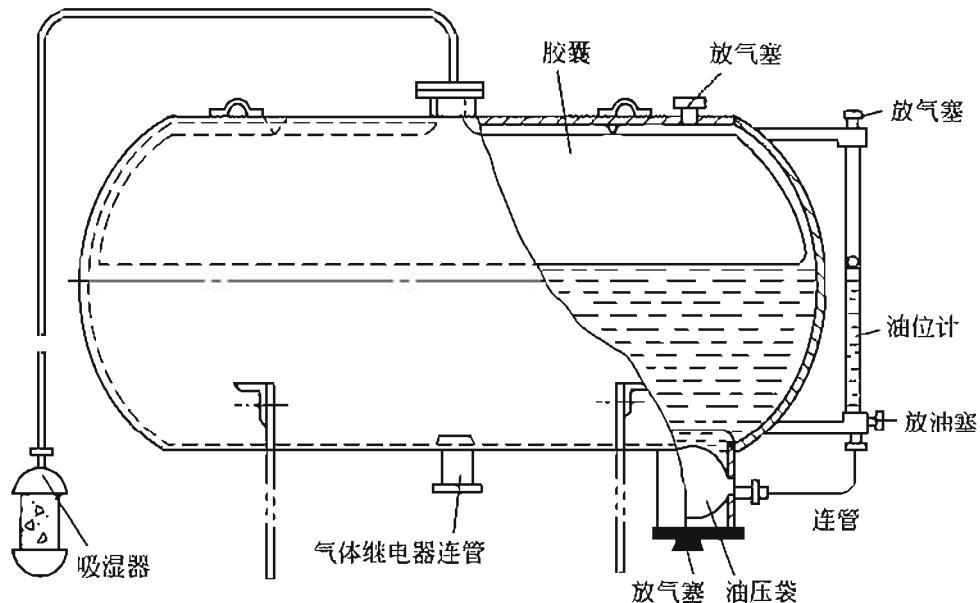


图 3-42 胶囊式储油柜

40. 指针式油位计

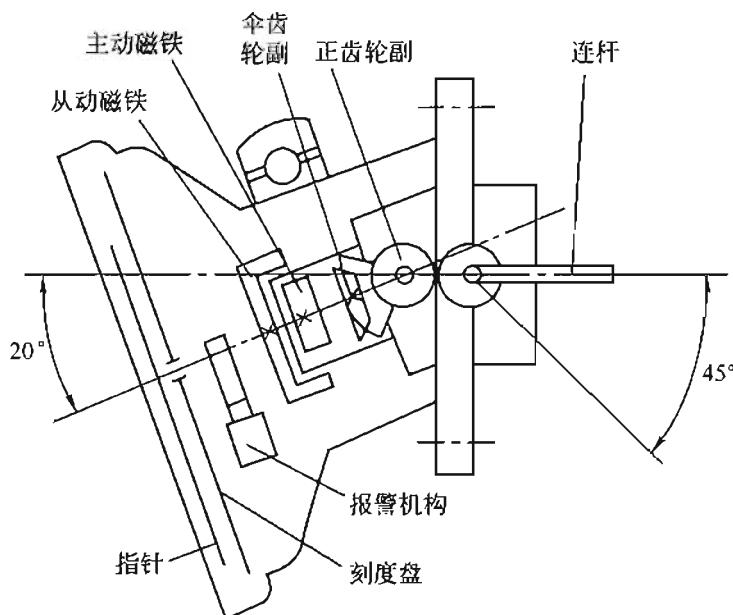


图 3-43 指针式油位计基本结构

全密封式储油柜一般都采用指针式油位计。指针式油位计又称铁磁式油位计，基本结构如图 3-43 所示。它适用于大型隔膜式等油浸式变压器的储油柜，具有显示油位和最低和最高极限油位的报警。常用的指针式油位计有 UZB 型和 UZF 型油位计，其中：U—油位计、Z—指针式、B—变压器用、F—浮球式。

指针式油位计以储油柜隔膜或浮球为感受元件，其连杆与浮球或隔膜上支板铰链连接，连杆的一端与表体的传动机构连接，将油面的上、下线位移变成连杆绕固定轴的角度位移，再通过一对磁铁等传动机构使指针转动，间接显示油位。表内装有极限油面的信号设置，油面过高或过低时发出信号。油面过高溢出的变压器油使吸潮器失效。油面过低时继电器动作。

41. 吸湿器

吸湿器为装满吸潮物质的小罐，当储油柜上部空气室内的空气涨缩时，内部空气的排出或外部空气的吸入，都要通过吸湿器来进行。吸湿器的作用是使油枕内的油通过它与大气相连通时，由它吸收空气中的潮气和杂质，以保持绝缘油的良好性能。吸湿器的结构见图 3-44。其内部装有干燥剂硅胶，干燥的硅胶呈蓝色，吸潮后变为粉红色，应于更换或烘干后再次使用。

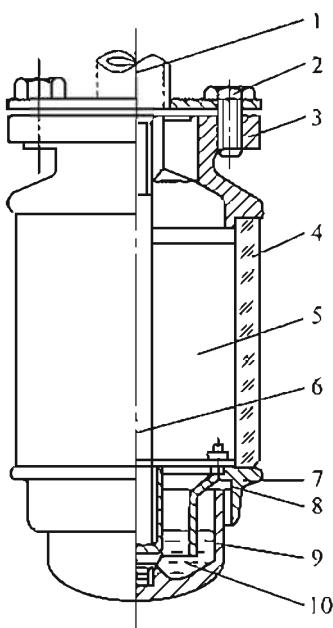


图 3-44 吸湿器

- 1—接变压器的连管（不包括在吸湿器中）；2—螺栓；
- 3—法兰盘；4—透明管；5—硅胶；6—螺杆；
- 7—座；8—储运密封用垫圈（安装时卸除）；
- 9—罩；10—变压器油

42. 信号温度计

变压器的寿命取决于变压器的运行温度。变压器在运行中，铁芯和绕组所产生的热量使变压器油温变化，温度计用来监测变压器的负载情况。温度计有水银温度计、信号温度计和电阻温度计。水银温度计准确但观察不便，只适用于小型变压器。1000kV·A以上的变压器安装信号温度计（压力式温度计）。8000kV·A及以上变压器还要装设电阻温度计（遥控温度计）。40000kV·A及以上变压器在长轴两端各有一个信号温度计和电阻式温度计。

对于风冷变压器应装设两个信号温度计，一个用于测量上层油温或绕组温度，另一个用于接冷却器的自动控制回路。

信号温度计主要由测温包、压力计和连接毛细管组成，如图3-45所示。它是利用饱和压力与温度的关系制成的。除了可指示温度外，还能实现温度控制或发出

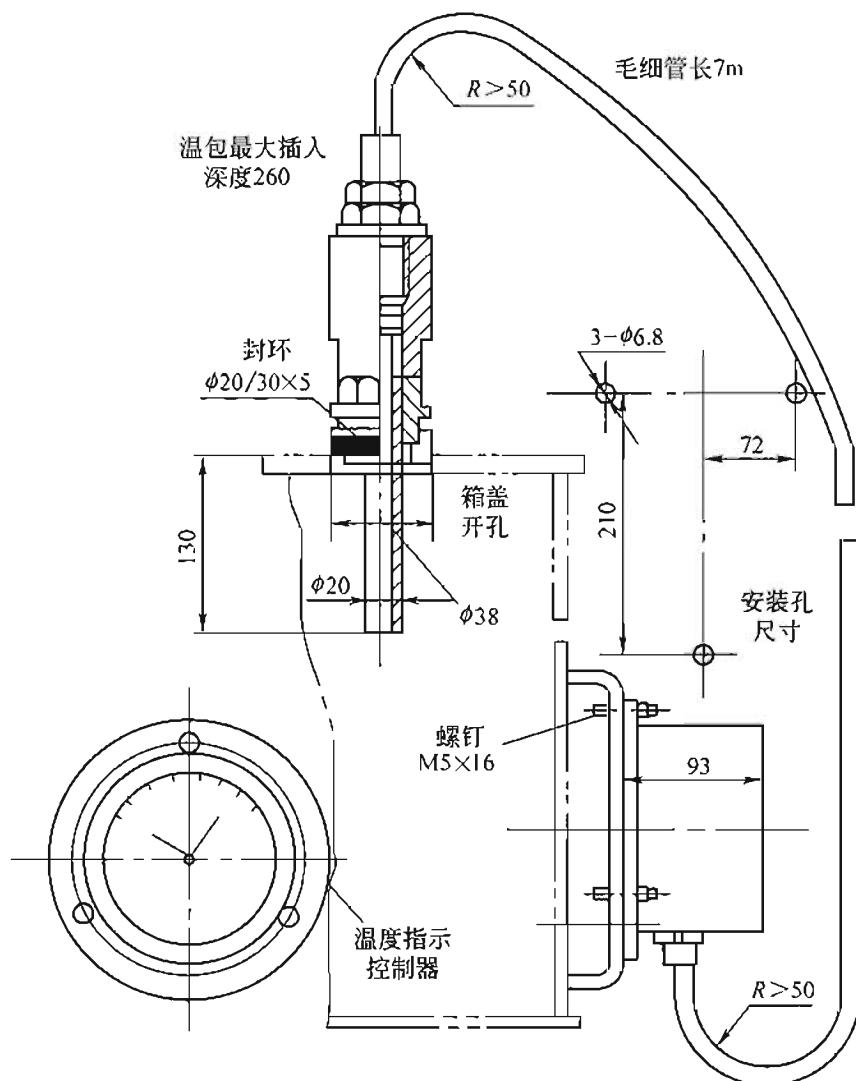


图 3-45 信号温度计安装图

信号，又称压力式信号温度计。

43. 气体继电器

变压器内部发生故障时，故障处的绝缘材料或油要分解，并产生气体，产生的气体聚集在容器上部，使油面下降，如图 3-46 所示，开口杯 2 下降，永久磁铁 3 随之下降，下降到某一位置，使舌簧接点 4 接通，发出警报信号。当变压器内部有严重故障时，有大量气体涌出，使连管中产生油流，流速达到一定值时，便冲动挡板 7，挡板运动到某一限定位置，永久磁铁 6 使舌簧接点 5 接通，从而切断变压器连接的所有电源，起到保护变压器的作用。放气塞可放出气体进行化验。

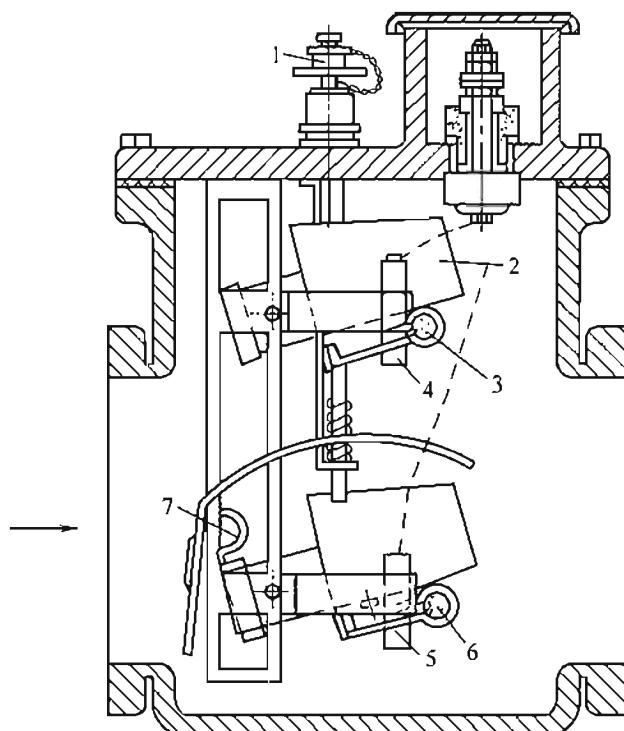


图 3-46 气体继电器的结构之一

1—放气塞；2—开口杯；3,6—永久磁铁；
4,5—舌簧接点；7—挡板

44. 挡板式气体继电器

挡板式气体继电器（见图 3-47）在变压器内部故障而产生气体使油面下降时，开口杯下降使上干簧接点接通而报警。当气体量多时冲动挡板，使下干簧接点接通而切断变压器，其放气塞可放出气体，安装时应有 2%~8% 的升高坡度。

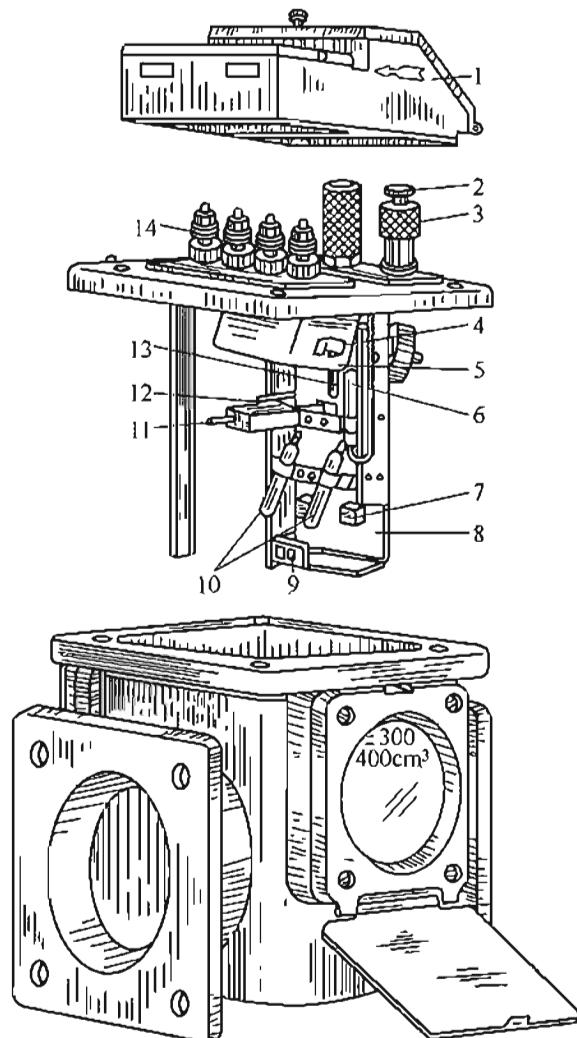


图 3-47 挡板式气体继电器

1—指向储油柜；2—顶针；3—嘴子；4—重锤；5—上磁铁和开口杯；6—上干簧接点；7—下磁铁；
8—挡板；9—螺杆；10—下干簧接点；11—调节杆；12—弹簧；13—探针；14—出线端子

第四章

变压器的安装维护

一般变压器制造的典型工序之间的关系，可用简易流程图表示如下。



变压器试验项目大致可分为绝缘试验及特性试验。

绝缘试验有：绝缘电阻和吸收比试验、介质损失角正切试验、泄漏电流试验、变压器油试验及工频耐压试验和感应耐压试验，电压较高的还须做局部放电试验、全波及操作波冲击试验。

特性试验有：变比试验、接线组别试验、直流电阻试验、空载试验、短路试验及温升试验等。

变压器投入运行前应做的工作如下。

首先检查变压器铭牌的数据是否全部符合现场实际要求。然后进行资料的检查，包括各种试验报告是否齐全、完整，是否符合规程要求。进一步对变压器外部进行检查，例如：检查电压表、电流表是否与变压器铭牌的额定电压、额定电流相配套；高、低压保险器中熔断器的选择是否符合标准；油位是否在油标范围内、变压器的油标号是否和实际相符，本体有无渗漏油现象；分接开关是否在所要求的挡位上；接地是否牢固；各侧出线管套是否完整、导电设备电缆连接是否牢固；高、低压侧引线是否松动，是否有破裂、断股等现象，绝缘是否良好；高、低压引线的安全距离是否符合要求；保护系统是否正常等。

变压器在投入运行前虽然进行了系统的检查及全面的试验，但在投入运行前仍然要用 1000~2500V 的兆欧表测量变压器高、低压线圈之间及对地绝缘电阻。其绝缘电阻值不应低于制造厂试验值的 70%。若无制造厂提供的数据，可参考表 4-1。

表 4-1 油浸式电力变压器线圈绝缘电阻的允许值/MΩ

高压组电 压等级/kV	温度/℃	阻值/(MΩ)							
		10	20	30	40	50	60	70	80
3~10	450	300	200	130	90	60	40	25	
20~35	600	400	270	180	120	80	50	35	
60~220	1200	800	540	360	240	160	100	70	

注：同一变压器中低压线圈的绝缘电阻标准和高压线圈相同。

1. 变压器绝缘电阻的测试（见图 4-1）

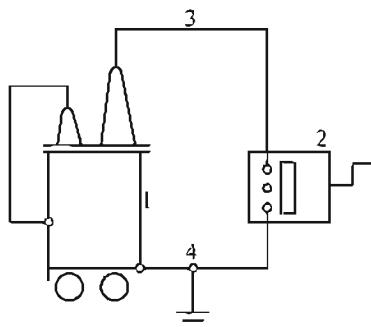


图 4-1 变压器绝缘电阻测试方法示意图
1—变压器；2—兆欧表；3—连接导线；4—接地线

2. 兆欧表（见图 4-2）

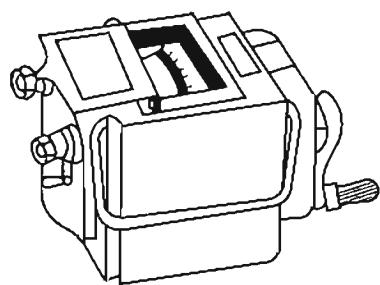


图 4-2 兆欧表外形

兆欧表又称摇表，是专门用来测量电气线路和各种电气设备绝缘电阻的仪表。计量单位是兆欧（MΩ）。

3. 兆欧表的测量方法（见图 4-3）

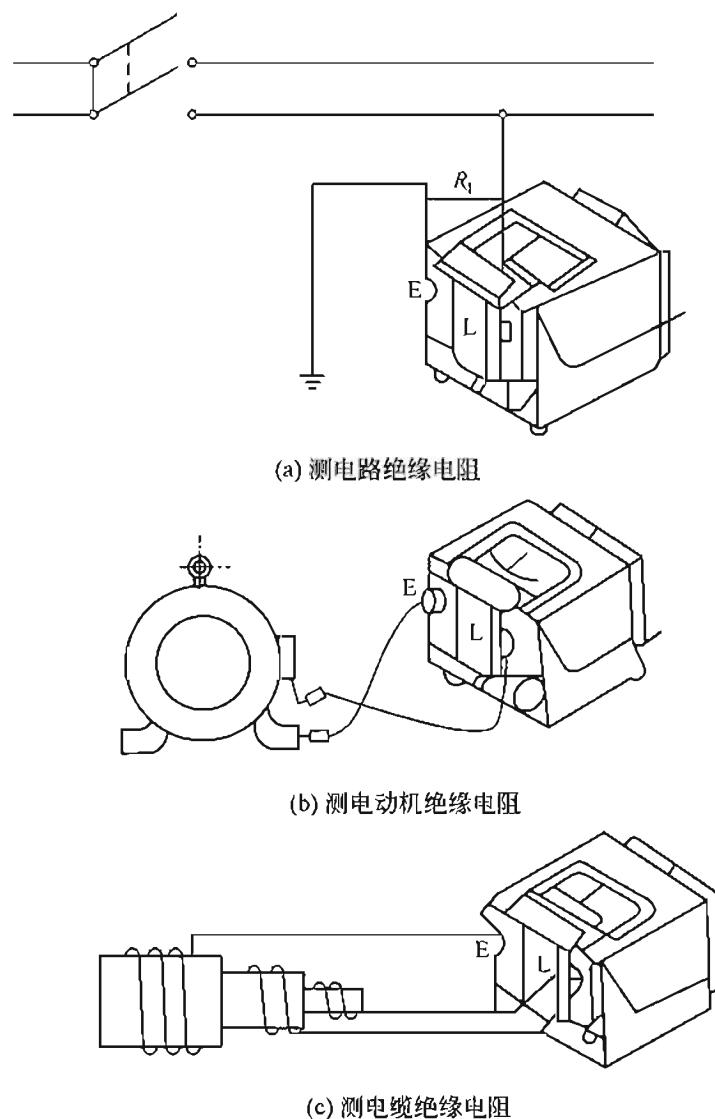


图 4-3 兆欧表的测量方法

（1）兆欧表的选用

应根据被测电气设备的额定电压来选择。测量 500V 以下的设备，选用 500~1000V 的兆欧表；测量 500V 以上的设备，则用 1000V 或 2500V 的兆欧表。

（2）测量方法

① 使用前，先将兆欧表的端钮开路，摇动手柄使发电机达到额定转速，观察指针是否指向“ ∞ ”；然后将“地”和“线”端钮短接，摇动手柄，观察指针是否指向“0”；如指针指示不对，需调修后再使用。

② 接线方法：将被测电阻接在端钮“线”（L）和“地”（E）之间。端钮“屏”（G）是用来屏蔽表面电流的。

③ 测量时，手摇发电机保持匀速，不要时快时慢使指针摆动，一般速度为

120r/min。以1min以后的读数为准。遇电容量特别大的被测物时，则以指针稳定不变为准。如被测设备短路，指针摆到“0”，应立即停止摇动手柄，以免烧坏仪表。

4. 测量Yd接线三相变压器绕组的绝缘电阻（见图4-4）

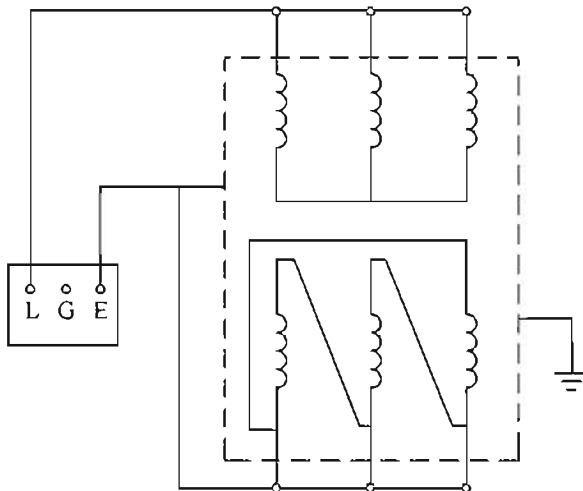


图4-4 测量变压器绕组绝缘电阻接线图

(1) 双绕组变压器绝缘电阻的测量部位和顺序

- ① 高压绕组对低压绕组、铁芯、夹件和油箱。
- ② 低压绕组对高压绕组、铁芯、夹件和油箱。
- ③ 高压绕组、低压绕组对铁芯、夹件和油箱。

(2) 测量要点

- ① 测试前先将被测绕组短路接地，使其充分放电。
- ② 在测量刚停止运行的变压器的绝缘电阻时，应将变压器从网上断开，等其上、下油温一致后，再进行测量。
- ③ 对于新投入运行或大修后的变压器，应在充油后静置一段时间，待气泡逸出后，再进行测量绝缘电阻。

5. 用万用表测量变压器极性

变压器的极性主要决定线圈的绕向，绕向改变极性也随之改变，极性是变压器并联的主要条件之一。如果极性接反，在变压器中会产生短路电流，甚至把变压器烧坏。

在变压器的高压绕组侧用一节1.5V干电池，一端与变压器线出端相接，另一端准备判别时搭接；低压绕组接入万用表，量程开关旋至毫安挡。当电池极搭接1端的瞬间，表针正摆，或者当电池搭接后从1离开瞬间，表针反摆，说明1、3为

同极性端。反之若搭接瞬间反偏或离开瞬间正偏，则说明 1、4 是同极性端（见图 4-5）。

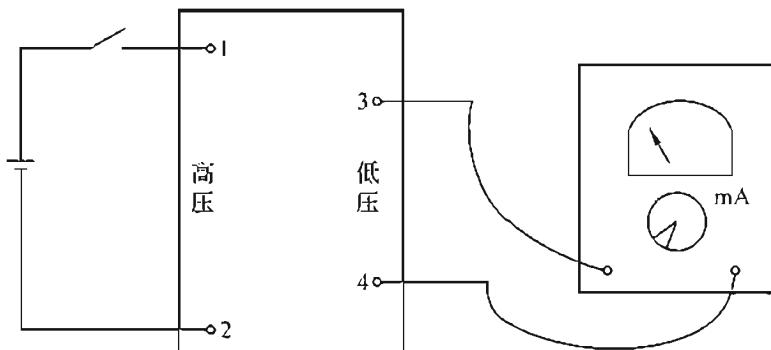


图 4-5 万用表判别变压器极性示意图

6. 用电压降法进行变压器直流电阻的测量

通过对线圈电阻的测量，可检查线圈是否断线、匝间有否短路、线圈内部导线的焊接质量、引线和线圈的焊接质量、线圈的导线规格是否合格、分接开关与引线及套管等载流部分的接触是否良好等。直流电阻测量最简单的方法是电压降法，其原理是根据欧姆定律： $R = U/I$ 。在被试电阻上通以直流电流，用多量程的伏特表测量电阻上的电压降，然后算出电阻，线路图如图 4-6 所示。图 4-6 (a) 接线时，考虑电压表电阻 r_v 的分路电流 IV ，可粗略测出线圈的电阻应为：

$$R = \frac{u}{I - IV} = \frac{u}{I - u/r_v}$$

图 4-6 (b) 接线时，考虑电流表电阻 r_a 上电压降，被测线圈的电阻应为：

$$R' = \frac{u - Ir_a}{I}$$

电压降法准确度不高，灵敏度低，需要换算和消耗电能，一般只适用于条件差，没有电桥的地区。

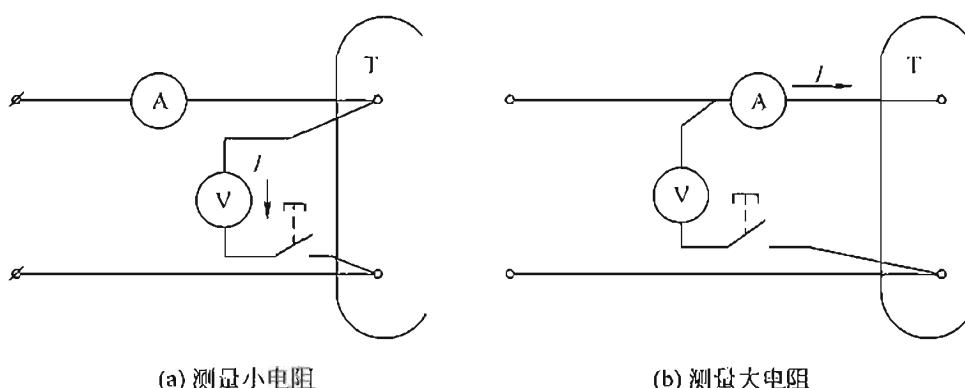


图 4-6 压降法测量电阻线路图

7. 变压器的变比测定

(1) 低压测量法

在高压绕组接入三相低压电源，分别测量高、低压各对应相的电压，如图 4-7 (a) 所示。

(2) 高压测量法

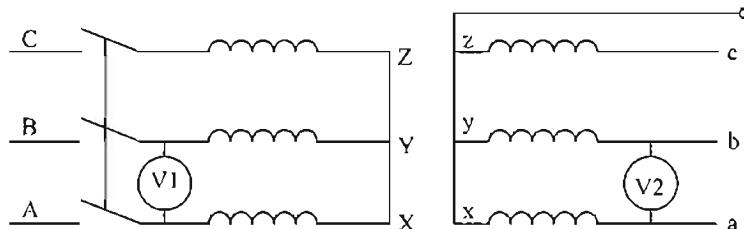
在低压绕组接入三相电源分别测量高、低压各对应相的电压，其中高压绕组的电压通过标准电压互感器测量，如图 4-7 (b) 所示。

(3) 测量时注意事项

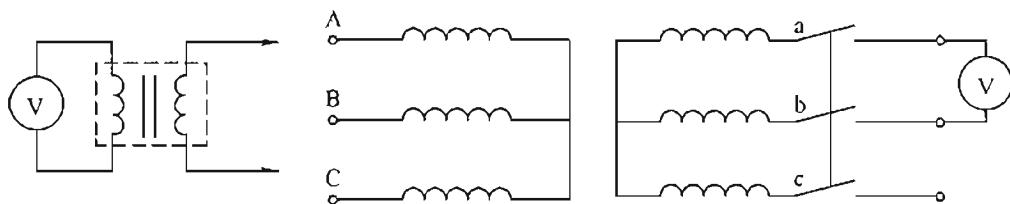
① 测量仪表的准确度不低于 0.5 级，量程选择应尽量使读数在表盘的 $1/2 \sim 3/4$ 处。

② 试验电源应稳定且三相平衡，高、低压侧两处电压表应同时读数，反复进行数次后取平均值。

③ 测量时应在高、低压对应相上进行，换相时先停电再换接。用高压测量法时应注意必须确保标准电压互感器高压引线对地的绝缘距离，其二次绕组和外壳均应良好接地。



(a) 低压测量法测量变压器变比接线图



(b) 高压测量法测量变压器变比接线图

图 4-7 测量变压器变比接线图

8. 变压器的空载试验

在变压器其他绕组开路的情况下，从一次侧绕组施加具有实际正弦波形、额定频率的额定电压，此时一次侧绕组通过的电流为空载电流，空载电流基本上是建立磁场的励磁电流，其数值一般为额定电流的 $2\% \sim 10\%$ 。变压器空载运行时产生的损耗

基本为铁损，这个损耗与变压器正常带负荷运行时的铁损近似相等（见图 4-8）。空载试验的目的是测定变压器空载损耗和空载电流，验证变压器的铁芯设计及工艺制造是否满足产品技术条件的要求；发现磁路中的局部缺陷；检查线圈匝间、层间及铁芯硅钢片间的绝缘情况和装配质量等。二次侧的开路电压即为二次侧的额定电压。

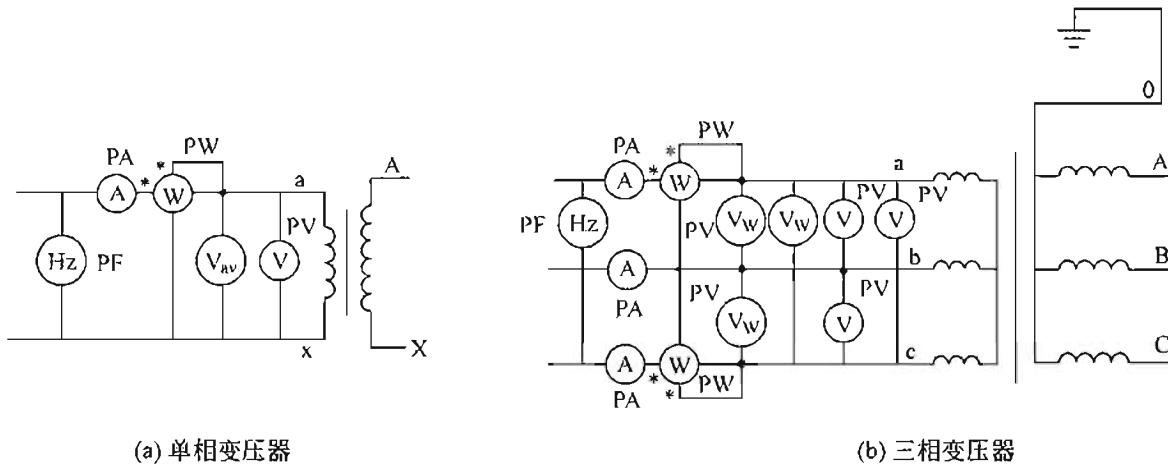


图 4-8 变压器空载试验接线图

PA—电流表；PV—电压表；PW—功率表； V_{av} —平均值电压表；PF—频率表

9. 通过互感器接入仪表三相变压器的空载试验

当输入的试验电压、电流超过仪表标称值时，可将仪表通过互感器接入测量回路中，如图 4-9 所示。

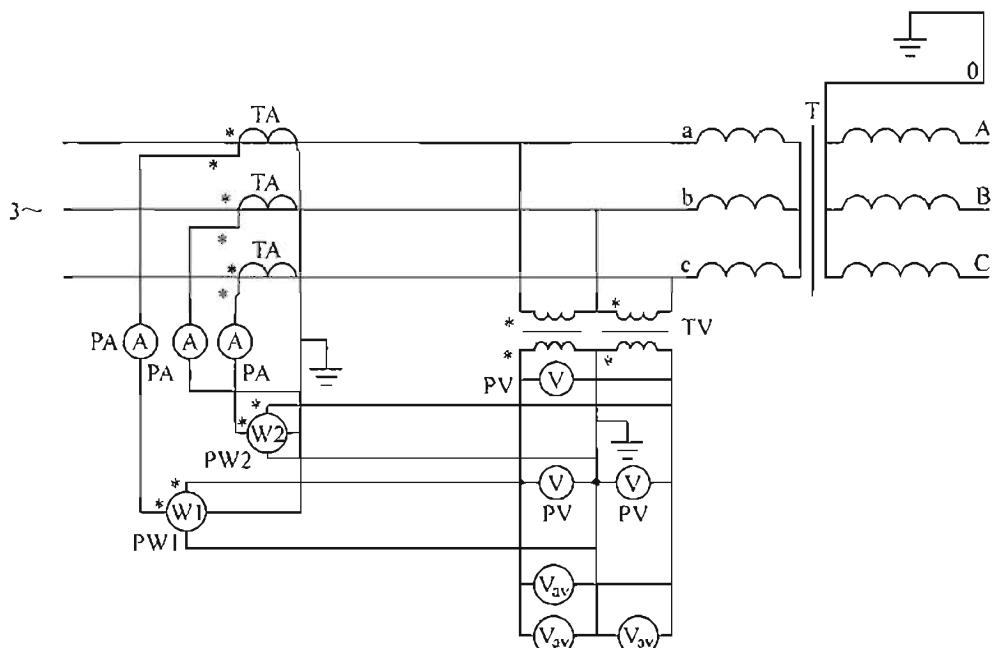


图 4-9 通过互感器接入仪表三相变压器的空载试验

TA—电流互感器；TV—电压互感器；PW—功率表； V_{av} —平均值电压表

10. 变压器负载试验和短路阻抗测量

负载试验就是将变压器一侧绕组短路，从另一侧施加额定频率、近似正弦波的电压（见图 4-10）。根据有关标准要求，变压器的负载损耗和短路阻抗的测量要在主分接上进行，试验时施加电流不得小于 50% 的额定电流。测得的负载损耗和短路阻抗应符合设计值或出厂试验值。

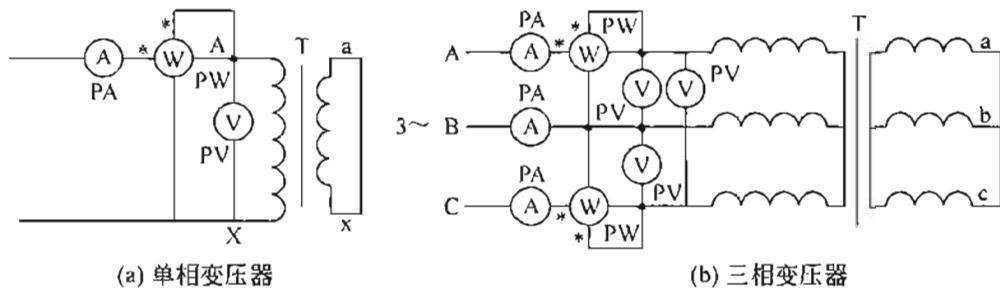


图 4-10 变压器负载试验接线图

PA—电流表；PV—电压表；PW—功率表

11. 通过互感器接入仪表三相变压器的负载试验

当输入的试验电压、电流超过仪表标称值时，可将仪表通过互感器接入测量回路中（见图 4-11）。

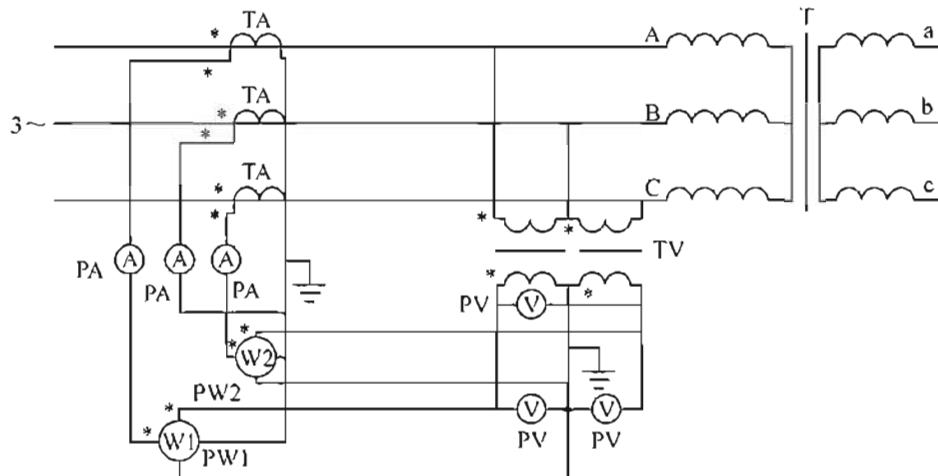


图 4-11 通过互感器接入仪表三相变压器的负载试验接线图

TA—电流互感器；TV—电压互感器；T—被测变压器

12. 单相电源进行三相变压器短路试验

变压器的短路试验主要是考核其承受短路的机械力及耐热通力。根据国家标准

规定变压器容量划分为三个类别：第Ⅰ类 $<2500\text{kV}\cdot\text{A}$ ；第Ⅱ类为 $2501\sim100000\text{kV}\cdot\text{A}$ ；第Ⅲ类为 $100000\text{kV}\cdot\text{A}$ 以上。

试验需在投入运行的新变压器上进行，必须在所有例行的出厂试验合格后才能进行，试验前应精确测量试验分接的电抗与电阻值，试验在变压器常态下进行，绕组温度为 $10\sim40^\circ\text{C}$ 。对于三绕组变压器应选择运行中最严重的短路情况进行试验，即对短路阻抗最小的一对绕组进行试验。

对于Ⅰ类变压器，短路试验通常使用三相电源，对于Ⅱ类、Ⅲ类变压器可使用单相电源。图4-12为单相电源进行三相变压器短路试验典型接线图。

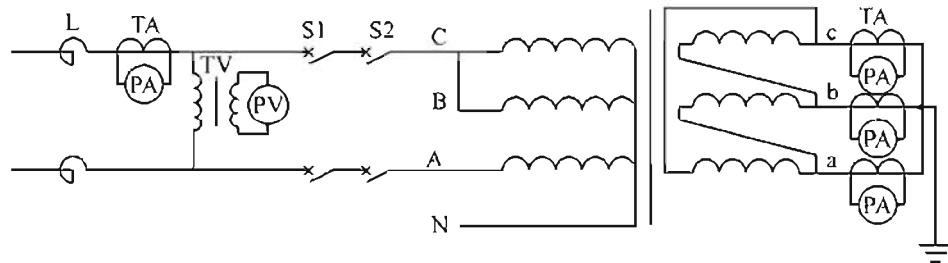


图4-12 单相电源进行三相变压器短路试验接线图

L—电抗器；TA—电流互感器；TV—电压互感器；S1—保护开关；
S2—合闸选相开关；PA, PV—波形记录仪

13. 三相电源进行三相变压器短路试验（见图4-13）

图4-13为三相电源进行三相变压器短路试验典型接线图。

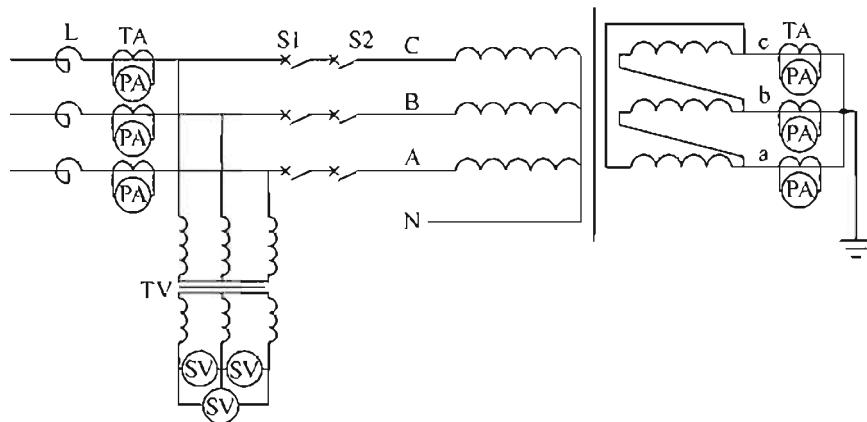


图4-13 三相电源进行三相变压器短路试验接线图

L—电抗器；TA—电流互感器；TV—电压互感器；S1—保护开关；S2—合闸选相开关；PA—波形记录仪

14. 变压器的耐压试验

变压器耐压试验的目的是检查变压器的绝缘状态，如果线圈或绝缘受潮损坏或夹杂异物时，都会在试验中产生局部放电或击穿。图4-14是变压器耐压试验接线

图，图中 R_1 为限流电阻，控制被试变压器击穿时的电流，以保护变压器不被烧毁。其电阻一般按每伏试验电压 $0.1 \sim 0.2$ 选择。

试验高压线圈时，将高压线圈各相连在一起，接到试验变压器上，低压各相端亦连在一起并与油箱一起接地，试验电压即加在被试验线圈与地之间。试验低压线圈与上述相反。试验时须注意：电压上升速度在试验峰值 40% 之内可任意进行，以后以匀速增至要求值。达到要求值后保持 1min ，然后均匀降低，约 5min 降至试验峰值的 25% ，然后切断电源。在试验过程中，如发现仪表变化或冒烟、放电，则停止试验，消除隐患后重试。试验时被试设备与试验设备应可靠接地，以防高压放电使人触伤。

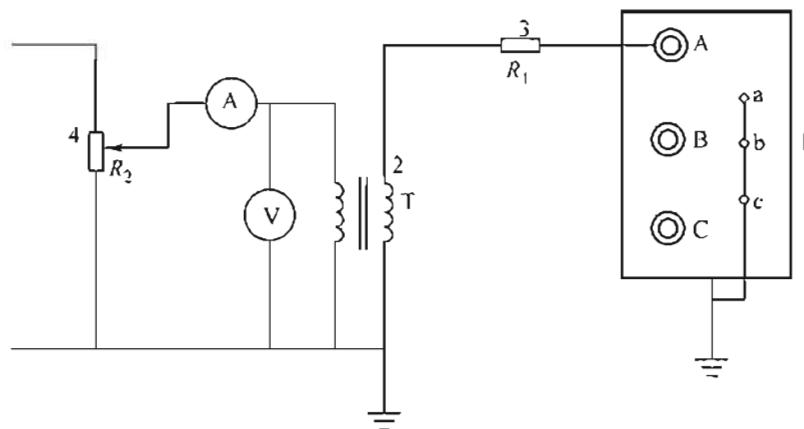


图 4-14 变压器的耐压试验接线图

1—被试变压器；2—试验变压器；3—限流电阻；4—调节电阻

15. 用直接负载法进行变压器的温升试验

在被试变压器的二次侧接以负载（如电炉、水电阻、电感或电容等），在一次侧加以额定电压。然后调节负载，使负载等于额定电流（见图 4-15）。

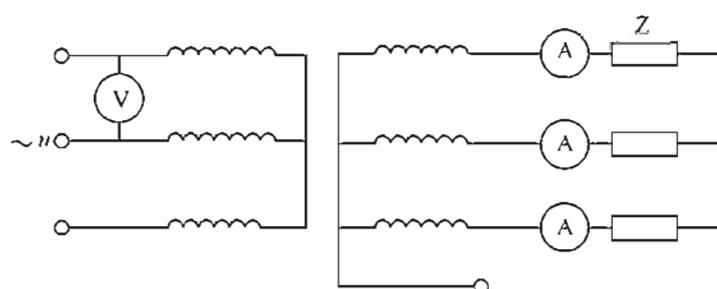


图 4-15 变压器直接负载法温升试验接线图

16. 铁芯多点接地故障具体位置的查找

(1) 直流法

主要检测电压来查找铁芯的多点接地故障位置，将铁芯与夹件的连接片打开，在铁轭两侧的硅钢片上通入 6V 的直流，然后用直流电压表依次测量各级硅钢片间的电压，如图 4-16 (a) 所示。当电压等于零或指针反向时，则可认为该处为故障接地点。

(2) 交流法

将铁芯与夹件的连接片打开，变压器低压绕组接入 220~380V 交流电压，此时铁芯中有磁通存在。如果有多点接地故障时，用毫安表沿铁轭各级逐点测量，如图 4-16 (b) 所示。当毫安表中电流为零时，则该处为故障点。

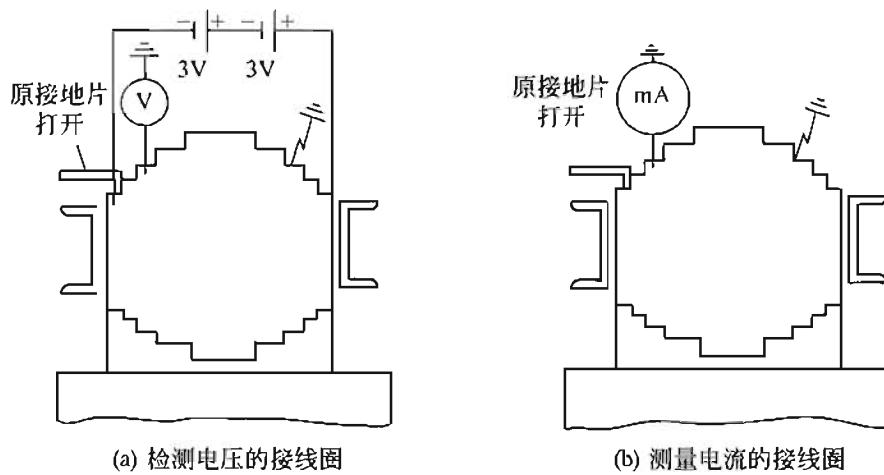


图 4-16 铁芯多点接地故障具体位置的查找

17. 铁芯可能发生的故障及处理方法

(1) 铁芯与夹件支板相碰（见图 4-17）

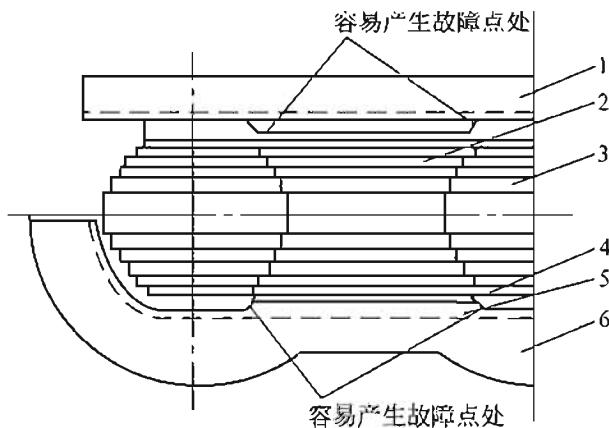


图 4-17 铁芯与夹件支板相碰示意

1—上夹件；2—铁轭；3—铁芯柱；4—油道；5—下夹件支板；6—下夹件

下夹件支板因距铁芯柱或铁轭的机械距离不够，变压器在运输过程或运行过程受冲击或震动，使铁芯或夹件产生位移后，两者相碰，造成铁芯多点接地。

处理方法是在故障点处，即铁芯夹件支板和铁芯硅钢片碰触部位垫入2~3层2mm厚的绝缘纸板，并将其固定牢靠。

(2) 硅钢片波浪凸起（见图4-18）

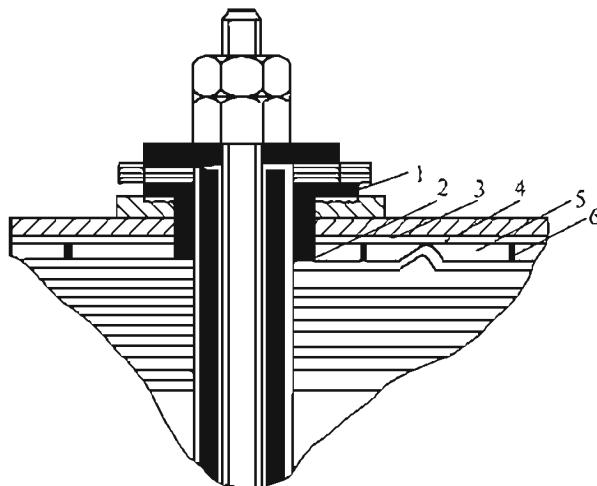


图 4-18 硅钢片波浪凸起示意

1—钢座套；2, 4—碰触处；3—夹件；5—夹件油道；6—油道垫条

上、下铁轭表面硅钢片因波浪凸起，在夹件和油道两垫条之间，与空心螺杆的钢座套或夹件相碰，引起铁芯多点接地。

处理方法是将钢座套锯短，使之与硅钢片距离不小于5mm。在与夹件碰接处垫2~3层2mm厚的绝缘纸板，并将其固定牢靠。

(3) 穿心螺杆与钢座套相碰（见图4-19）

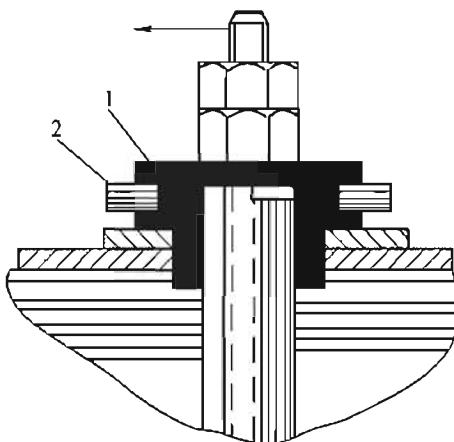


图 4-19 穿心螺杆与钢座套相碰示意图

1—穿心螺杆绝缘套管被挤坏后，穿心螺杆和钢座套相碰部位；2—钢座套

由于铁芯方铁与铁轭硅钢片间间隙太大，在器身起吊时，不是方铁先受力，而是穿心螺杆先受力，致使穿心螺杆上套装的电木绝缘管被挤坏，使穿心螺杆和钢座套相碰，造成铁芯多点接地。

处理方法是更换损坏的绝缘套筒，减小铁芯方铁与铁芯硅钢片之间的距离，在器身起吊时，使铁芯方铁先受力。

(4) 夹件与油箱壁相碰 (见图 4-20)

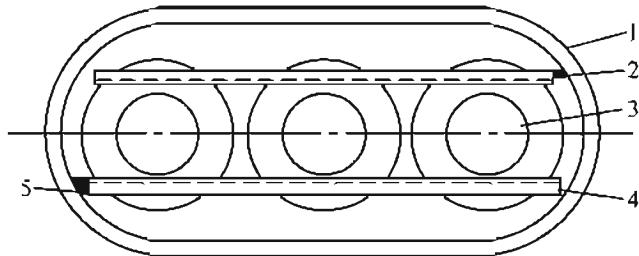


图 4-20 夹件与油箱壁相碰示意

1—油箱；2, 5—相碰处；3—铁芯；4—夹件

夹件与油箱相碰造成铁芯多点接地，是由于夹件太长或铁芯定位装置松动，当器身受冲击力产生位移所致。

处理方法是校正器身位置，紧固铁芯定位装置，或修割夹件过长部分，确保夹件与油箱有 10mm 的距离。

(5) 旁轭围屏接地引线和铁芯下铁轭相碰

对三相五柱式铁芯，其旁轭围屏接地引线与铁轭相碰会造成铁芯多处接地，如图 4-21 所示。

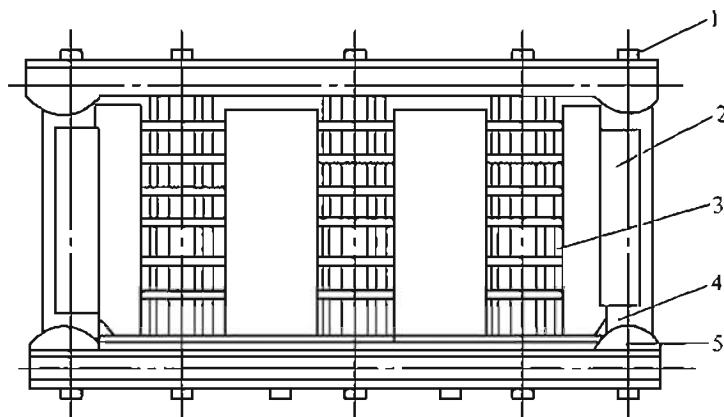


图 4-21 旁轭围屏接地引线和铁芯下铁轭相碰示意

1—上夹件；2—旁轭围屏；3—铁芯柱；4—旁轭围屏接地引线；5—旁轭围屏接地引线与铁轭相碰处

处理方法是恢复旁轭围屏接地引线的位置，并将接地引线绝缘固定。

(6) 钢座套与铁芯相碰 (见图 4-22)

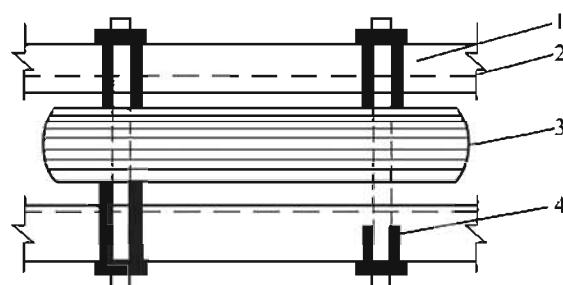


图 4-22 钢座套与铁芯相碰示意

1—钢座套与铁芯相碰处；2—夹件；3—铁芯；4—锯短后的钢座套

由于穿心螺杆的钢座套太长，使钢座与铁芯表面硅钢片相碰，造成铁芯多点接地，如图 4-22 所示。

处理方法是锯短钢座套，使钢座套与铁芯表面硅钢片之间有大于 5mm 的距离。

(7) 下铁轭与箱底桥接短路（见图 4-23）

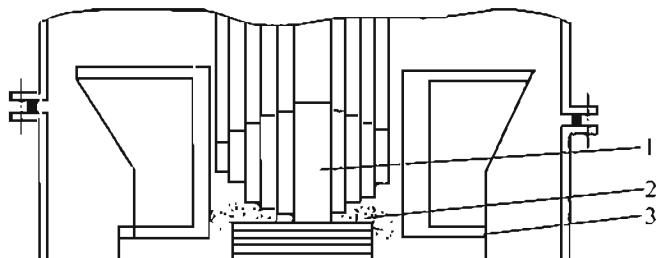


图 4-23 下铁轭与箱底桥接短路示意

1—铁芯；2—杂物或油泥；3—铁芯垫脚绝缘

由于变压器铁芯底部垫脚绝缘损坏或因油泥杂物沉淀箱底，造成铁芯下铁轭与油箱底部相连，形成铁芯多点接地。

处理方法是将油箱底部清理，找出并除去“搭桥”的导电体。

18. 变压器吊铁芯

变压器安装前，一般都要对其芯部进行检查，并及时处理所发现的问题，对于普通的电力变压器，需要把芯部从油箱吊出来，即所谓“吊芯检查”。

为了使铁芯吊出和放入油箱时不碰撞箱壁，而且落在油箱底的铁垫脚上，起吊前应将油箱放平。操作时，先将顶盖与油箱连接的螺栓全部卸开，然后将钢丝绳系在顶盖的吊环（或吊钩）上。吊环的全部螺丝应拧紧。为了避免吊环受力弯曲，应使钢丝绳在起重机吊钩处与垂直线所成的角度不超过 30°，必要时可用木撑的方法，使吊环只受垂直方向的力，如图 4-24 所示。挂好钢丝绳并经检查确认牢固可

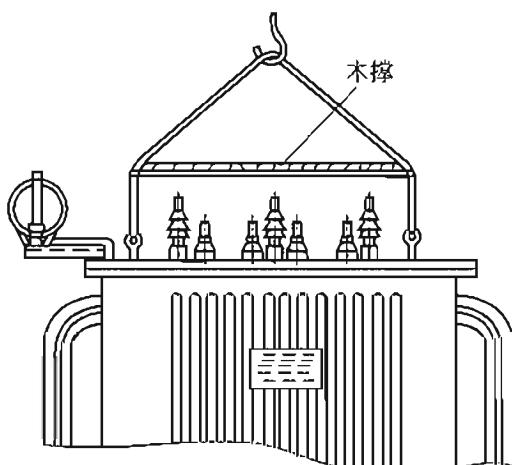


图 4-24 变压器吊铁芯示意

靠后，再起吊，起吊速度应缓慢，防止碰触油箱。铁芯吊出后，用干净的道木垫在油箱的边缘，然后将铁芯放在道木上。

19. 钟罩式油箱的起吊

钟罩式油箱的结构给现场进行器身的检查维修带来方便，在检修时只要把上节油箱吊开就可以，如图 4-25 所示。而且目前最大容量的产品上节油箱重量不超过 30t，这就降低了对现场起重设备的要求。

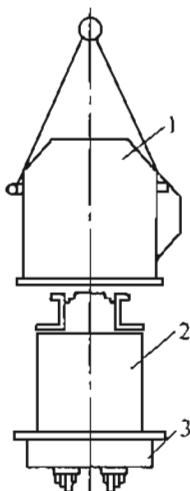


图 4-25 钟罩式油箱起吊示意
1—钟罩式上节油箱；2—器身；3—下节油箱

20. 气体继电器的安装

有气体继电器的变压器应该倾斜安装，倾斜方向如图 4-26 所示，即装有油枕的一边应较高，使其顶盖沿气体继电器方向有 1%~1.5% 的升高坡度。这样可使

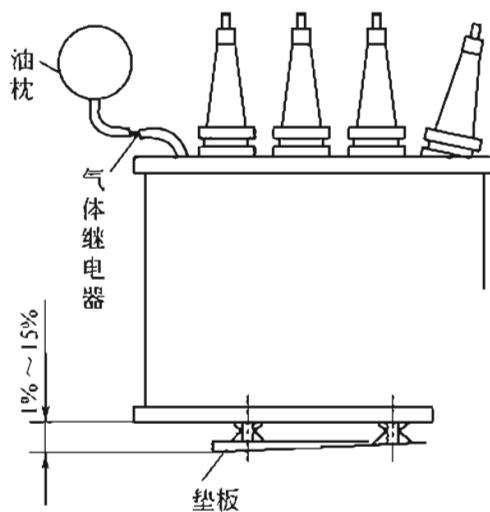


图 4-26 气体继电器的安装示意图

变压器内发生的气体易于跑向油枕，从而促使气体继电器正确可靠地动作。

21. 净油器在变压器的连接

在 $3150\text{kV}\cdot\text{A}$ 及以上变压器规定要安装净油器。这是为了延长变压器中油的运行期限，通常采用热虹吸滤油器，以对油进行连续不断的再生处理。热虹吸滤油器是一个内部装满粗粒吸附剂的圆筒，上下各有一个联管，连接到变压器上。由于变压器油箱中上下层油温不同，油箱中以及滤油器中上下部分油的密度不同，所以油就在热虹吸滤油器中连续不断地自上而下循环流动。在往热虹吸滤油器中注油前，必须排除空气。为此滤油器的顶盖上装有专用排气阀。油从滤油器下部的联管吸入。当排气阀中不再有空气逸出时（已出现油），关闭排气阀，打开热虹吸滤油器的上部油门，就可投入运行。净油器在变压器中的连接见图 4-27。

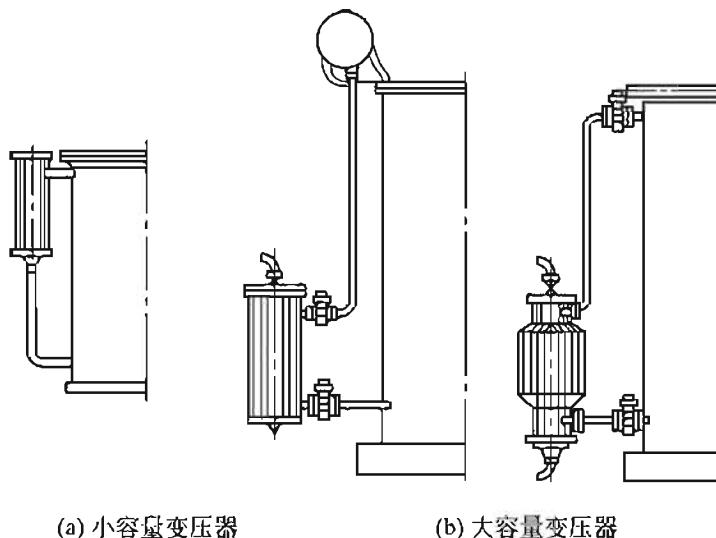


图 4-27 净油器在变压器中的连接

22. 瓷套管检查

应定期检查瓷套管是否清洁，有无裂纹或放电痕迹，螺纹有否损坏及其他异常

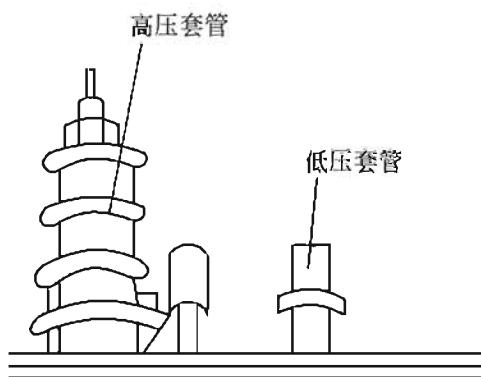


图 4-28 瓷套管

现象，如发现应尽快停电更换，如图 4-28 所示。检查各密封处有无渗漏和漏油现象，严重的及时处理。

23. 检查油位

应经常检查储油柜的油位高度及油色是否正常，如发现油位过低应加油，如图 4-29 所示。

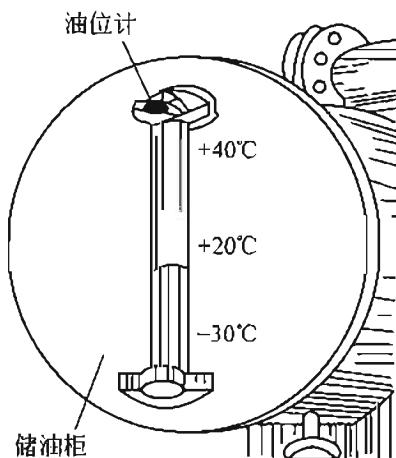


图 4-29 油位计图

24. 检查油温

检查箱顶油面温度计的温度与室温之差是否低于 55℃，如图 4-30 所示。定期进行油样化验及观察硅胶是否吸潮变色，需要时进行更换。

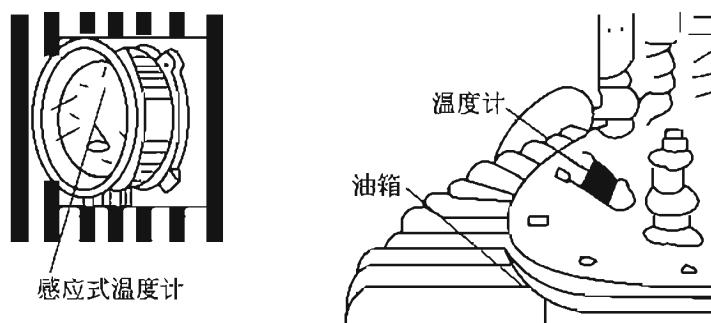


图 4-30 温度计

25. 冷却装置检查

检查冷却装置是否正常，油箱环有否破坏，如图 4-31 所示。

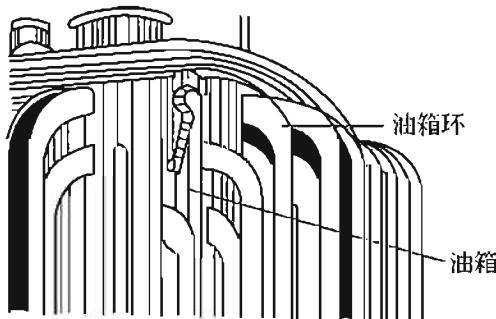


图 4-31 油箱及油箱环

26. 中小型变压器不应受力处为何漏油？

中小型变压器的储油柜支架多用扁钢弯制而成，见图 4-32。安装搬运时，储油柜的高度和位置正适合操作挪动整个变压器，因而易使储油柜到油箱盖上的法兰盘受力过大，如图中 A 处，因焊缝裂开而漏油。又因这类小变压器往往装在台架上，使在进行其他安装时蹬在储油柜上，也会使连接管和法兰盘渗漏油。

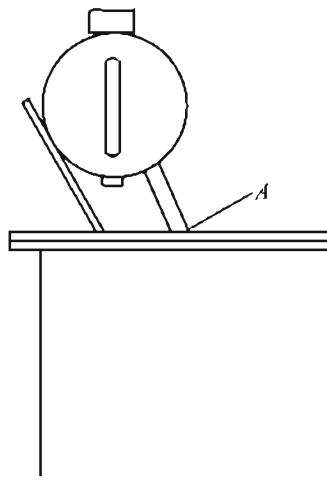


图 4-32 中小型变压器安装示意

27. 变压器油枕严密性试验

变压器严密性试验可用如下方法：取长度为 $0.3\sim0.6\text{m}$ 的钢管，将其拧紧在变压器油嘴内，将变压器呼吸孔关闭，从漏斗中加入与变压器油型号相同的变压器绝缘油，如图 4-33 所示。对于管状和平面油箱试验时，应采用 0.6m 油柱压力；对波状油箱和有散热器的油箱，则采用 0.3m 的油柱压力，并持续 15min 。同时要检查散热器、油箱、油枕、套管法兰等变压器各部件的结合处是否漏油、渗油。如有渗漏应及时处理。试验后，应将油面降到正常范围，并及时打开呼吸孔。

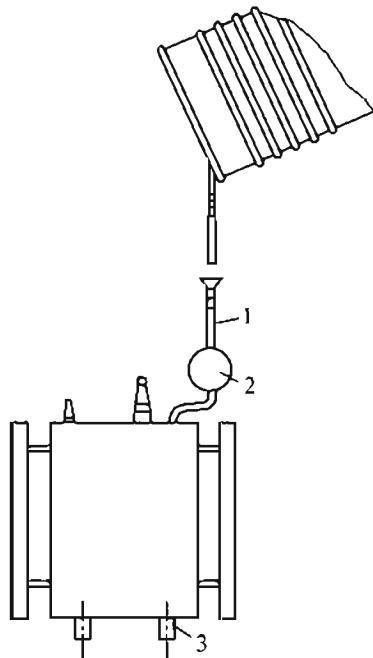


图 4-33 变压器油枕严密性试验示意
1—钢管；2—油枕；3—滚轮

28. 密封胶垫的质量是变压器渗漏油的原因之一

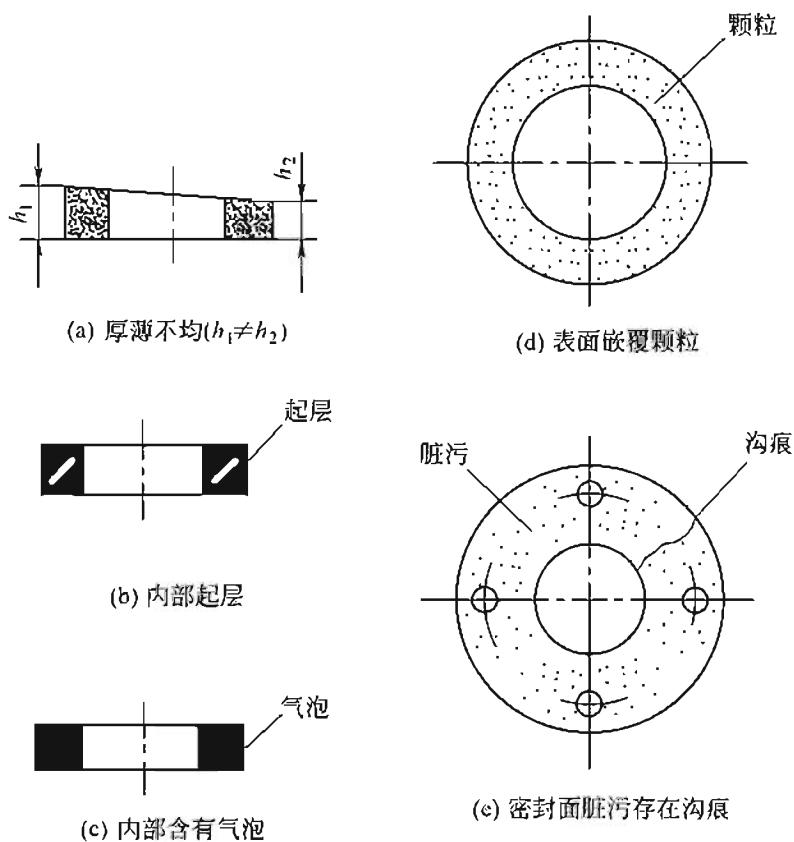


图 4-34 密封胶垫

密封胶垫的工艺质量问题也是造成变压器渗漏油的原因之一。如弹性小、硬度低、吸油率高、抗老化性能差、厚薄不均、内部起层、含有气泡、表面嵌覆颗粒等，如图 4-34 所示。

29. 绕组内部油道及油流方向

变压器绕组在变压器中是最重要的导电部件，各种结构形式的绕组都必须满足绝缘强度要求、动稳定要求及散热能力要求。在绝缘结构中，分布着很多油道，这些油道起到绝缘作用，还满足了绕组的散热要求。作为绕组的冷却油道，应尽量减小油流的阻力，避免有“死油区”，通常采用的绕组内部油道及油流方向如图 4-35 所示。

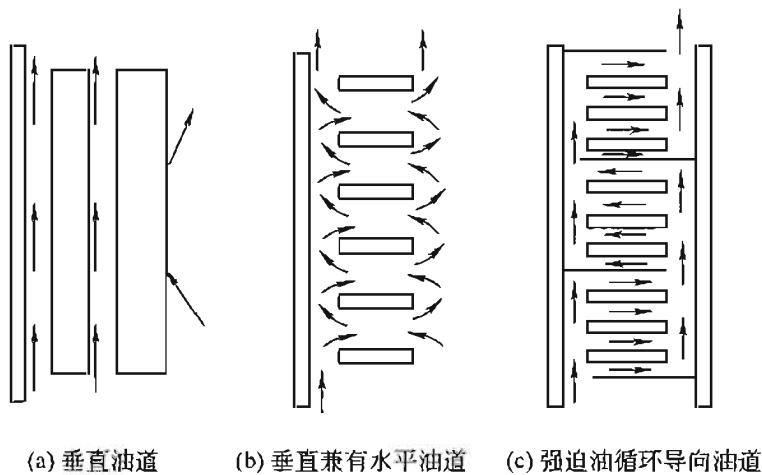


图 4-35 绕组内部油道及油流方向

30. 真空注油

(1) 变压器注油方式

有常规注油和真空注油，真空注油系统如图 4-36 所示。其中油罐中的油为经真空净油机进行脱水、脱气处理的油。板式滤油机进一步过滤油中杂质，其出口油压约为 490kPa，真空泵抽气速率应为 10~20L/s。

(2) 真空注油程序

- ① 检查真空和注油部分密封是否良好，正常后开始抽真空。
- ② 启动真空泵，在 2h 内均匀提高真空度至要求值。遇雨天应停止抽真空，并注意油箱局部变形不得大于箱壁厚的 2 倍。真空度达到要求，则在真空状态下注油。
- ③ 注油时间要大于 6h，距油箱顶盖 200mm 时停止注油。维持真空 6h 后解除真空。打开各连接蝶阀和所有放气塞，继续从油箱下注油，直至所有放气塞溢油。

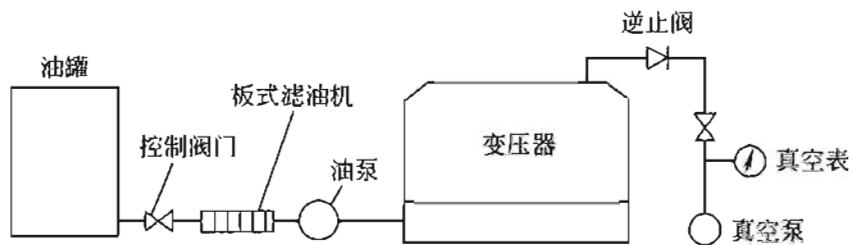


图 4-36 真空注油系统图

时，即时拧紧，注油至相应储油柜上的油面线时真空注油结束。

31. 变压器油的真空喷雾处理（见图 4-37）

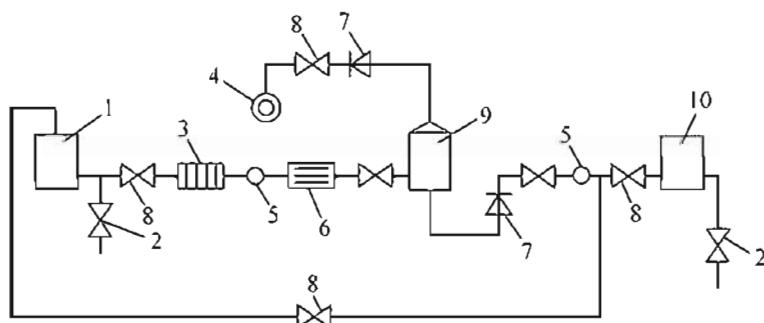


图 4-37 变压器油的真空喷雾处理系统流程图

1—污油罐；2—取油样阀门；3—板式滤油机；4—真空泵；5—油泵；6—加热器；
7—逆止阀；8—控制阀门；9—真空雾化罐；10—净油罐

32. 变压器热油喷雾真空干燥

热油喷雾真空干燥法是用变压器油作为干燥变压器的加热介质，干燥过程中，油经加热后通入变压器油箱内，在真空条件下，热油喷成雾状与铁芯、绕组和绝缘

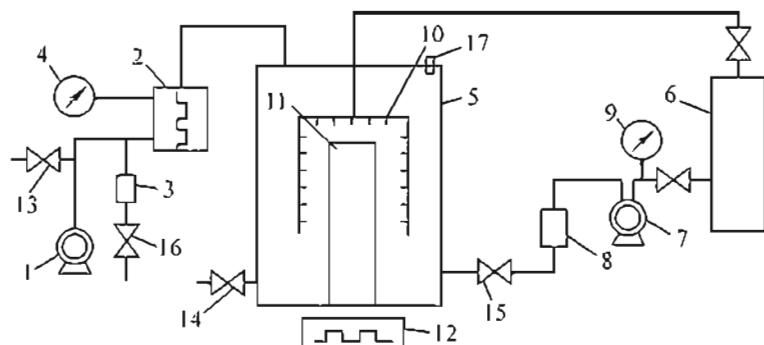


图 4-38 变压器热油喷雾真空干燥系统流程图

1—真空泵；2—冷却器；3—凝结水罐；4—真空表；5—变压器；6—加热器；7—油泵；
8—滤过器；9—压力表；10—喷嘴；11—测温元件；12—电热器；13—真空度控制阀门；
14—真空破坏阀门；15—油量控制阀门；16—放水阀门；17—测温元件

件等充分接触（见图 4-38）。热交换面较大，且内部油污易冲洗，加热油的温度可取 105℃，若油箱能承受较高的真空度，在干燥过程中水分迅速蒸发，加上采用定期破坏真空和逐级提高真空的排潮工艺，干燥效果更好。这种干燥方法特别适合已浸油的高电压、大容量变压器的现场干燥。

33. 热油喷淋真空干燥

(1) 热油喷淋真空干燥的装设

热油喷淋（循环）的管路及所需干燥设备的连接和装设见图 4-39。注入的油通过循环油泵和真空滤油机进行循环，由外装的加热器和真空滤油机内加热器对油进行加热，注入到变压器喷淋的油温最好能达到 90℃，不能低于 80℃。如进入变压器中的油达不到温度要求，则需增加热源，可以在油箱底部用电热器加热。但必须在电热器和油箱底部之间垫薄钢板，以保持油箱底部温度均匀。为防止铁芯垫脚与油箱底之间的绝缘老化，油箱底部温度应控制在 100℃左右。

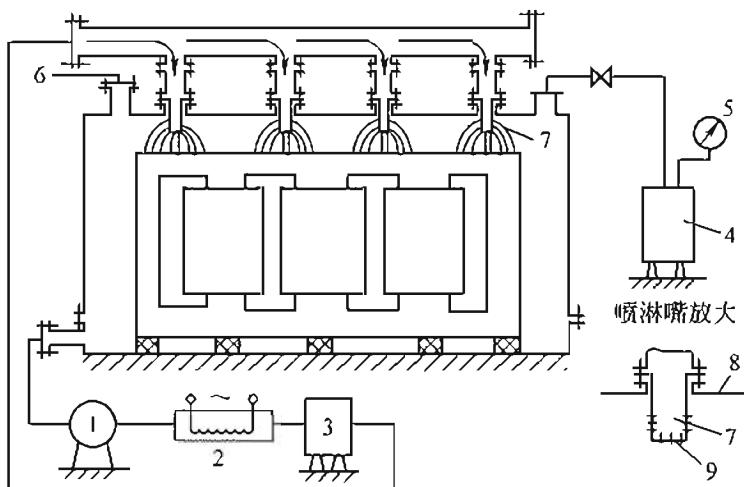


图 4-39 热油喷淋循环干燥系统图

1—油泵；2—电加热器；3—真空滤油机；4—真空泵；5—真空表；
6—麦式真空计；7—喷淋嘴；8—油箱；9—φ2mm 小孔

(2) 热油喷淋真空干燥的操作步骤：

① 器身预热阶段。只喷淋不抽真空，热油带出的水分经过真空滤油机脱水，待进口油温达到 85~90℃，回油温度不低于 65~75℃时保持 2~3h。

② 停止喷淋只抽真空。采用测量绕组直流电阻的方法来推算绕组平均温度。连续抽真空 8~12h，如绕组温度降低到 40℃左右时，即使连续抽真空时间不足 8h，也应停止抽真空。

③ 停抽真空再进行喷淋。待循环的变压器油进口处达 90℃，回油温度 75℃时保持 2~3h。

④ 第二次停止喷淋，抽真空 8~12h。如此往复循环 3~4 个周期即可完成

干燥。

⑤ 每次循环都要测量绕组的绝缘电阻，为测量准确常需降低真空或解除真空（为防潮要吸入干燥空气）。

⑥ 用喷淋干燥法时少量热油会老化，其介质损耗因数会增大，必须化验合格才能继续使用，否则需将油经吸附处理才能继续使用。

34. 油箱铁损法干燥变压器

在带有铁质油箱的变压器油箱外壁上缠绕线圈，并通以交流电，使箱壁在交变磁通作用下，产生涡流损耗发热，对变压器进行干燥。图 4-40 (a) 是油箱铁损干燥法示意。当变压器油箱包好保温层后，可在保温层外立上一圈 10~12mm 厚的木板条。木条间的距离为 100~120mm，励磁线圈就绕在木条上。励磁线圈的匝数和电流根据变压器容量、外壳周长、环境温度等因素考虑，绕制线圈的导线应采用橡皮绝缘线。为使油箱上、下部温度均匀，上半部绕总匝数的 1/3，下半部绕总匝数的 2/3。导线不要太密集也不要交叠，每匝导线间要有一定间距。为了防止导线受热后松动，木板条上应刻有线槽或用小木块支托使导线分开，并设法固定。根据变压器容量缠绕励磁线圈加温不十分准确，因此缠绕的线圈有几个抽头，以便在干燥时进行调整。抽头位置在所选取总匝数的 ±15% 处，以便调节温度，见图 4-40 (b)。

干燥过程必须对线圈温度监测，变压器线圈的最高温度不超过 95℃，外壳温度不超过 115℃，箱内温度不超过 105℃。线圈绝缘电阻在连续 6h 内稳定，则可认为干燥完毕。

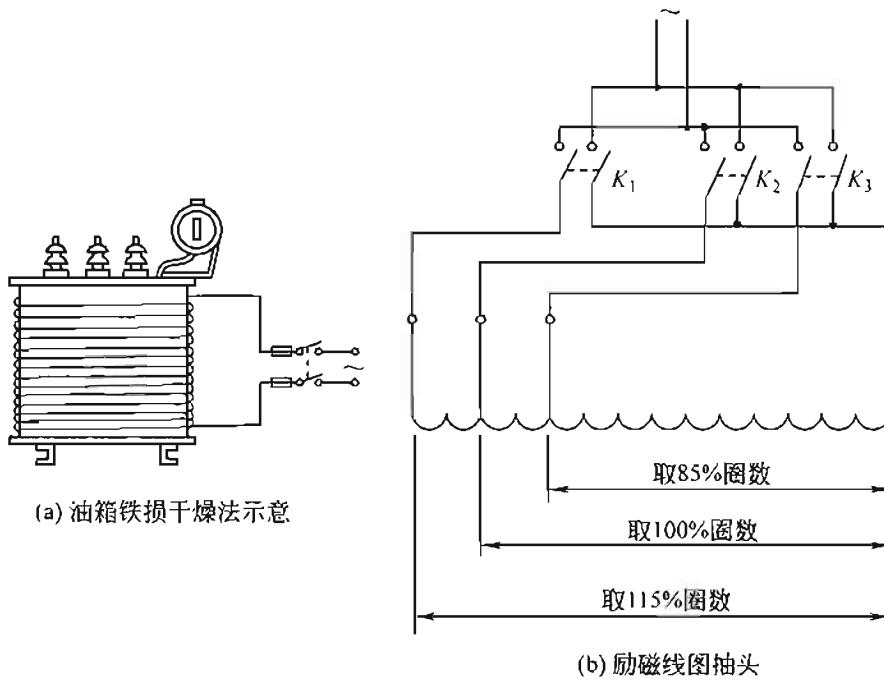


图 4-40 用油箱铁损法干燥变压器

35. 废旧油处理

废旧油的物理处理方法有沉降、过滤、离心分离、物理-化学净化等。沉降是从油中除去水分和机械杂质的常用方法。利用水分和机械杂质的密度比油品大，在重力的作用下，可使大部分混杂物从油中沉降而被分离，图 4-41 是沉降罐示意。沉降速度是影响沉降分离的关键因素，油中机械杂质的密度或颗粒直径越大，或油的黏度、密度越小，则混杂物的沉降速度就越快，其分离效果也越好。

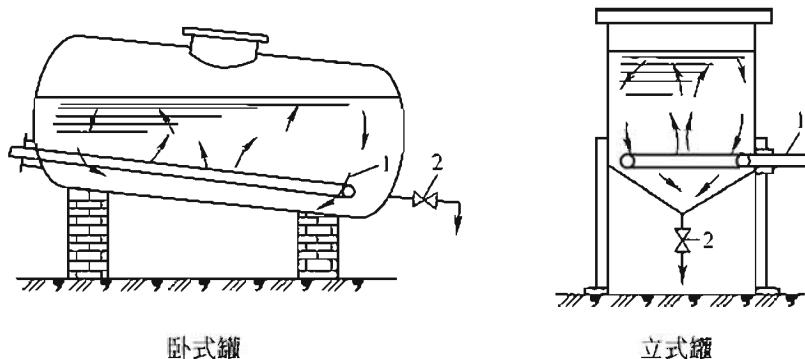


图 4-41 沉降罐示意

1—加温蒸汽盘管；2—排污阀

36. 强迫油流动渗滤法再生系统

渗滤法再生是将吸附剂装入柱形渗滤器中，废旧油连续通过渗滤器与吸附剂接触并反复循环，以获得较好的再生效果。在渗滤法再生过程中油可依靠位差自流，也可以通过泵送强迫油流动，图 4-42 是强迫油流动渗滤法再生系统。使用的吸附剂是颗粒状的，适用于再生设备内换下的油和运行中的油。

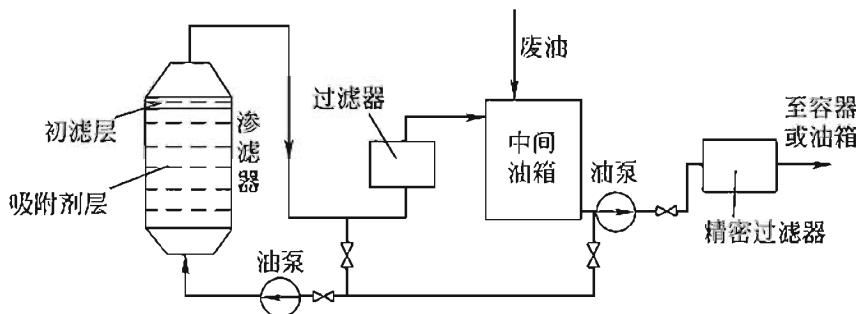


图 4-42 强迫油流动渗滤法再生系统

37. 吸附渗滤法实例——运行变压器油带电再生原理流程

渗滤法最大优点是能够对运行中的变压器油进行旁路在线的连续处理，图 4-43

为变压器油在变压器中的带电再生处理实例。吸附法再生的油还需过滤净化，以保证油的机械杂质含量合格。

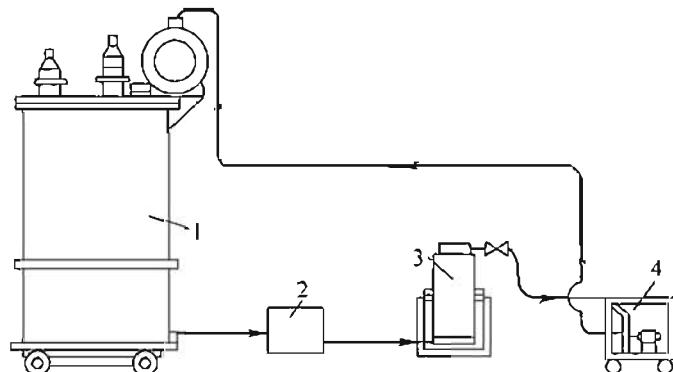


图 4-43 运行变压器油带电再生原理流程图

1—变压器；2—电预热器；3—吸附剂滤器；4—过滤机

38. 变压器故障分析及检查

(1) 变压器故障检查步骤 (见表 4-2)

表 4-2 变压器故障检查步骤

1. 外观检查	检查引出线有否断线、虚焊、脱焊，绝缘材料有否烧焦、损伤，通电后是否有焦味或冒烟等
2. 绕组通断或短路检查	用万用表检查绕组通断情况。检查绕组是否短路，可在绕组中串联一个灯泡，其电压和功率根据电源变压器电压的容量确定，通电后观察灯泡的亮暗程度来检查绕组内部有否断路
3. 绝缘电阻检查	用兆欧表测试绕组之间、绕组与铁芯、绕组与机壳的绝缘电阻，其值应在 $1M\Omega$ 以上
4. 额定工作电压检查	在变压器一次侧绕组上接额定电压，测定二次侧的空载电压。一般误差在 $\pm(3\% \sim 5\%)$ 之间
5. 变压器温升检查	变压器接入额定负载，通电 1h，温度不得超过变压器绝缘材料允许温度。温度升高会使绝缘老化，影响变压器使用寿命，甚至烧毁

(2) 变压器常见故障 (见表 4-3)

表 4-3 变压器常见故障

1. 电源接通后无输出电压	①一次绕组开路或引出线脱焊。如一次回路有电压而无电流，一般是引出线头损坏，若断裂线头在外层，可拨开绝缘层找出断头进行修复；若断裂线头在内层，则需重新绕制 ②二次绕组开路或引出线脱焊。若一次回路有较小的电流，而二次回路无电流也无电压，则一般是二次绕组断路或引出线端头断裂，处理方法同①
---------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

续表

2. 温升高或冒烟	①匝间短路或一、二次绕组间短路。若存在匝间短路，短路处温度会急剧上升。若是同层排列左右两匝或多匝之间短路，则过热现象严重。产生短路多是绕组遭受外力撞、刮、拉，或漆包线老化等原因 ②铁芯片间绝缘太差，产生较大涡流。如铁芯内部发热，就要拆下硅钢片，重新绝缘处理后再装配 ③超负载运行或输出电路局部短路。应减轻负载或排除输出端短路故障
3. 空载电流过大	①一次绕组匝数不足需重绕 ②铁芯截面不够引起磁饱和，增加叠片厚度或重新设计 ③一、二次局部匝间短路，用兆欧表检查并修复
4. 运行中噪声大	①变压器固定支架松动。检查螺钉与支架 ②若噪声为机械声，即铁芯未压紧，应把铁芯压紧 ③若是电磁噪声，通常是铁芯磁通密度选得过高或变压器过载、漏电、二次侧短路等原因引起的，应分别处理 ④电源电压过高也会出现电磁噪声，应测量电源电压作相应处理
5. 铁芯或底板带电	①一、二次绕组对地短路，解决绝缘问题 ②长期运行，绕组绝缘老化产生漏电，应将绕组重新浸漆或重绕 ③引出线头碰触铁芯或底板 ④绕组受潮或环境温度过高，底板感应带电。应重新烘烤绕组加强绝缘，或将变压器置于通风干燥环境中使用

(3) 变压器修理后检查

表 4-4 变压器修理后检查

1. 绝缘电阻测量	用兆欧表测量各绕组之间、绕组对铁芯的绝缘电阻，其值应大于 $1M\Omega$
2. 空载电压测试	一次侧输入电压时(AC220V)，二次侧空载电压允许误差小于 10%
3. 空载电流测试	一次侧输入电压时(AC220V)，其空载电流应为额定电流值的 5%~8%。若空载电流超过额定值的 10%，则损耗较大；若空载电流超过额定值的 20%，则变压器发热严重，不能使用

第五章

安全用电知识

当人体触及设备带电部分时，就有电流流过人体并产生危害作用。当人体通过 50mA 的工频电流时，就可能危及生命，当人体通过 100mA 的工频电流时，一般会造成死亡。

接地就是电气设备或装置的某一点与大地之间用导体做可靠而且符合技术要求的电气连接。有工作接地、保护接地、防雷及防过电压接地等多种，在电力系统中常用的是工作接地和保护接地。

为保证电气设备的正常运行而进行的接地叫工作接地。如变压器中性点接地。在三相四线制电网中将电气设备的金属外壳与零线可靠的连接叫保护接零。

所谓保护接零，就是把电气设备的外壳与三相四线制电网的零线相连接。当电气设备绝缘损坏时，由于中性线的电阻很小，短路电流很大，很大的短路电流将使电路中的保护开关动作，或使电路中的保护熔丝断开，切断电源，防止触电。

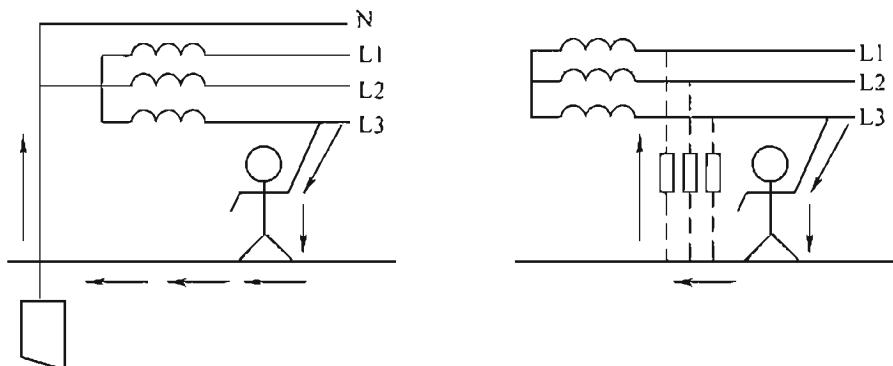
所谓保护接地，就是把电气设备不带电的金属外壳和支架等用导线同接地装置相连接。其目的是当带电部分绝缘损坏而使金属外壳和支架带电时，则由于接地装置的接地电阻很小，外壳对地电压大大降低。当人体与外壳接触时，外壳与大地之间形成两条并联支路，电气设备的接地电阻越小，通过人体的电流就越小，所以可防止触电。同时避免雷击时损坏设备。

总之，接地和接零都是为了保证人身安全，防止发生触电事故而设置的保护设施。在使用中必须注意：在同一系统中，一般只宜采用一种保护方式，即全部保护接地或者全部保护接零。不应对一部分设备采取接地，对另一部分采取接零。否则，当接地的设备发生碰壳时，零线电位将升高，使所有接零的设备外壳都带危险电压，产生不安全因素。

1. 单相触电

人体的一部分接触三相导线中任意一根相线，称为单相触电。

在三相 380V 电源中性点接地系统中，当人身与任一根相线接触时，对于人体



(a) 中性点接地系统的单相触电

(b) 中性点不接地系统的单相触电

图 5-1 单相触电

的电压为 220V，流过人体的电流足以危及生命。在中性点不接地系统中，虽然线路对地绝缘电阻可起到限制人体电流的作用，但线路对地存在分布电容、分布电阻，作用于人体的电压为线电压 380V，仍可达到危害生命的程度。

2. 两相触电

人体同时触及带电设备或两相导线，或在高压系统中人体同时接近不同的两相带电体，而发生电弧放电，电流从一相导体通过人体流入另一相导体，构成一个闭合回路就是两相触电，如图 5-2 所示。发生两相触电时，作用在人体上的电压等于线电压，所以这种触电方式最危险的。

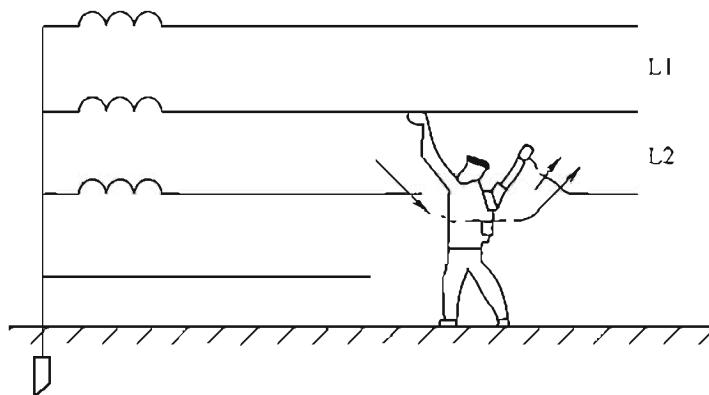


图 5-2 两相触电

3. 接地体附近的电位分布

当电气设备绝缘损坏或由于其他原因发生接地短路时，电流通过接地体在地中向四周流散。由于半球形的球面在距接地体越近的地方越小，故其电阻和电压降越靠近接地体越大。在距接地体较远的地方传导电流的面积增大，电阻减小，故其电

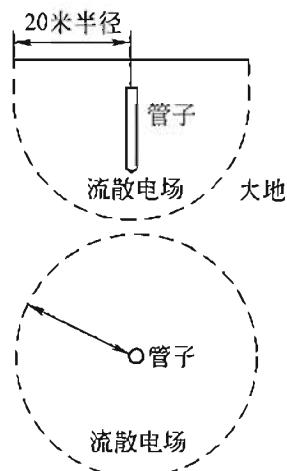


图 5-3 通过接地体的电流在地中流散情况

压降逐渐减小。通过实验可知：在距接地体或电流流入地 20m 以上的地点，电位一般接近零。

4. 接触电压、跨步电压触电

当接地电流从接地体向地中流散时，在接地体周围地面上即形成一个电压分布区域。在这区域里的人接触到漏电设备的外壳时，即受到接触电压 E_1 。当人的两脚站在这种带有不同电位的地面上时，两脚间所呈现的电位差称为跨步电压 E_2 。

电流从一只脚流进，从另一只脚流出，所造成的触电称为跨步电压触电。

接触电压和跨步电压的大小与接地电流、土壤电阻率、设备接地电阻及人体位置有关。当接地电流较大时会因其超过允许值而发生人身触电事故。特别是在发生高压接地故障或雷击时，会产生很高的接触电压和跨步电压。因此雷雨时，不应躲在大树下避雨，因为雷击中大树时，雷电沿树干入地，以树干为中心的周围地面有较高的电位分布，人立在树下即受到危险的跨步电压。

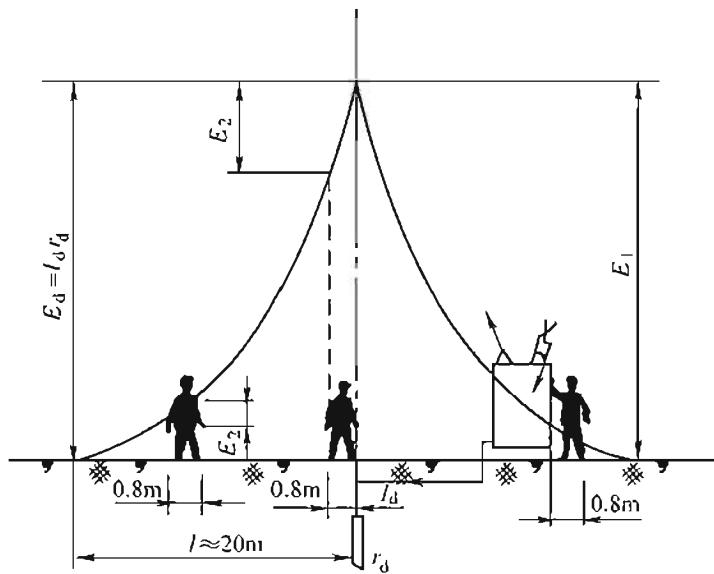


图 5-4 接触电压和跨步电压的示意

5. 保护接地

接地就是电气设备或装置的某一点与大地之间用导体做可靠而且符合技术要求的电气连接。有工作接地、保护接地、防雷及防过电压接地等多种，在电力系统中常用的是工作接地和保护接地。

保护接地是指为防止设备漏电而造成触电事故，将电气设备的金属外壳进行接地，如图 5-5 所示。

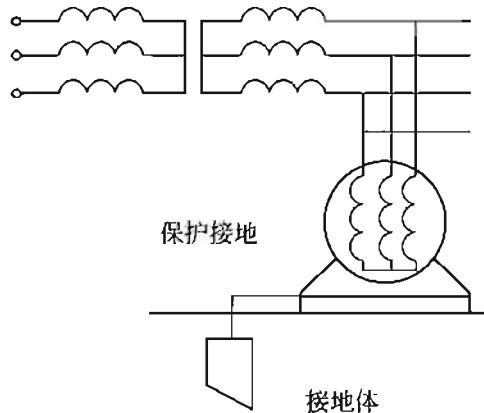


图 5-5 保护接地

保护接地适用于中性点不接地的低压供电系统，如果电气设备的绝缘损坏使金属导体碰壳。由于接地装置的接地电阻很小，外壳对地压大大降低，当人体与外壳接触时，外壳与大地之间形成两条并联支路，人体的电阻大于接地处的电阻，所以几乎没有电流通过人体，从而保证了人身安全。反之，若外壳不接地，则电流将通过人体，经线路对地电容或其他漏电途径形成回路，造成人身触电。

6. 保护接零

为保证电气设备的正常运行而进行的接地叫做工作接地。如变压器中性点的接地。

在三相四线制电网中将电气设备的金属外壳与零线可靠的连接，叫保护接零，如图 5-6 所示。

保护接零是在电源中性点接地的低压供电系统中，把电气设备的金属外壳、框架和中性线相连接。如果电气设备绝缘碰壳，由于中性线的电阻很小，短路电流很大，很大的短路电流使电路中的保护开关动作，切断电源，防止触电。保护接零的防护作用比保护接地更完善。

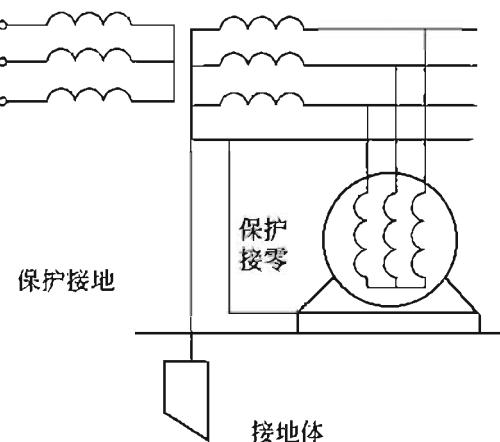


图 5-6 工作接地和保护接零

7. 重复接地

在中性点接地的三相四线制低压电网中除采用保护接零外，还要将自中性点引出的工作零线相隔一定距离多处进行接地，这种做法叫做重复接地，如图 5-7 所示。

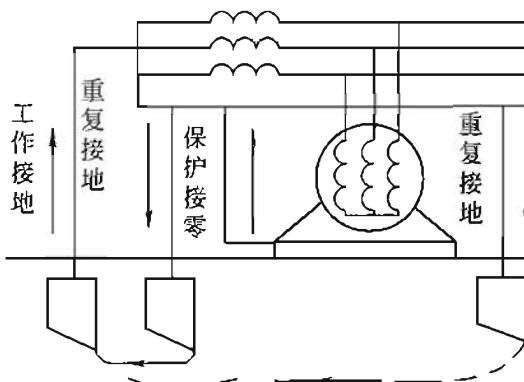


图 5-7 工作接地、保护接零和重复接地

其作用是当系统发生碰壳或接地短路时，可降低零线对地的电压，当零线意外断裂时，可减轻故障的程度。

在三相四线制供电系统中多采用这种保护接法，由于中性线干线的截面不可能选得很大，因而中性线的对地电阻不可能为零。当三相负载不平衡时，在中性线中会有电流并产生压降，特别是在供电线路较长的情况下，中性线对地电压可能较高。采用重复接地能有效降低中性线的对地电压。进户线的辅助接地线即为重复接地。

8. 电流对人体的影响

电流通过人体后，能使肌肉收缩产生运动，造成机械损伤。电流产生热效应和

表 5-1 电流对人体的影响

电流/mA	交流电(50Hz)		直流电
	通电时间	人体反应	人体反应
0~0.5	连续	无感觉	无感觉
0.5~5	连续	有刺麻、疼痛感，无痉挛	无感觉
5~10	数分钟内	痉挛、剧痛，但可摆脱电源	有针刺、压迫及灼热感
10~30	数分钟内	迅速麻痹，呼吸困难，不能自由	压痛、刺痛，灼热感强烈、有抽搐
30~50	数秒至数分钟	心跳不规则，昏迷，强烈痉挛	感觉强烈，有剧痛痉挛
50~100	超过 3s	心室颤动，呼吸麻痹，心脏停跳	剧痛，强烈痉挛，呼吸困难或麻痹

化学效应可引起一系列急骤的病理变化，特别是电流流经心脏，对心脏的损害极为严重，极小的电流可引起心室纤维性回动，导致死亡。电击伤对人体的伤害程度与电流的种类、大小、接触部分、持续时间、人体健康状态都有关系。从表 5-1 可看出交流电对人体的损害作用比直流电大。

9. 触电急救法——口对口人工呼吸法

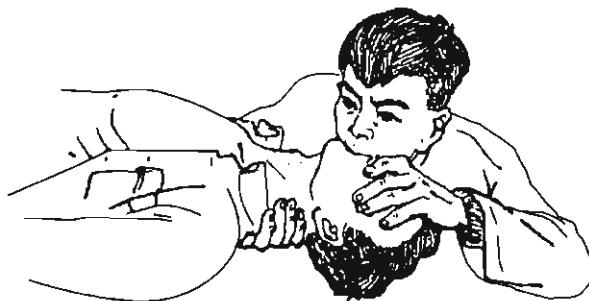


图 5-8 口对口人工呼吸示意

触电者解脱电源后，往往处于昏迷状态，如呼吸停止，用口对口的人工呼吸法效果较好。具体操作如下：

- ① 将触者仰卧，解开衣领裤带，然后将触电者头偏向一边并张嘴，清除口中异物。
- ② 使呼吸畅通。
- ③ 抢救者在触电者一边，以近其头部的手紧捏其鼻以免漏气，并用手掌外缘压其颈部，将颈部上抬，使头部充分后仰。
- ④ 急救者先深吸一口气，然后用嘴紧贴触电者的嘴或鼻孔大口吹气，同时观察胸部是否隆起，以确定吹气是否有效和适度。
- ⑤ 吹气停止后，急救者头稍偏转，放松捏鼻，让气体从触电者肺部排出。此时倾听呼气声，观察是否呼吸道梗阻。
- ⑥ 如此反复进行，每分钟吹气约 12 次。

10. 触电急救法——体外心脏挤压法

触电者解脱电源后，受害者往往处于昏迷状态，如心跳停止，则用体外人工心脏挤压法来维持血液循环。体外心脏挤压是指有节律地对心脏挤压，用人工的方法来代替心脏的自然收缩，从而达到血液循环的目的。操作方法如下：

- ① 使触者仰卧于硬板上，以保证挤压效果。
- ② 抢救者跨越在触电者的腰部。
- ③ 抢救者以一手掌放在触电者胸骨下 $1/2$ 处。中指指尖对准其颈部凹塘下沿，



图 5-9 人工胸外心脏挤压示意

离胸一手掌的距离，掌根所在处为正确压区。另一手压在该手的手背上，肘关节伸直，依靠体重及肩部肌肉的力量，垂直用力，向脊向压迫胸骨下段，使胸骨下段与其相连的肋骨下陷 3~4cm，间接压按心脏内血液循环。

④ 挤压后突然放松，要注意不能离开胸膛，此时心脏舒放，大静脉的血液回到心脏。

⑤ 连接操作，每分钟约 80 次。

参 考 文 献

- [1] 姚志松, 姚磊. 新型配电变压器结构、原理和应用. 北京: 机械工业出版社, 2007
- [2] 张学武. 变压器检修技术 1000 题. 北京: 中国电力出版社, 2006
- [3] 中国电机工程学会城市供电专业委员会, 上海电力变压器制造有限公司. 变压器检修. 北京: 中国电力出版社, 2004
- [4] 曹永安. 中小型变压器实用技术问答. 北京: 中国水利水电出版社, 2007
- [5] 马茂军. 维修电工操作技术要领图解. 山东: 山东科学技术出版社, 2007
- [6] 周希章. 电工技术手册. 北京: 中国电力出版社, 2004
- [7] 陈化钢, 张开贤, 程玉兰. 电力设备异常运行及事故处理. 北京: 中国水利水电出版社, 2006
- [8] 熊幸明, 曹才开, 王新辉. 电工电子实训教材. 北京: 清华大学出版社, 2007
- [9] 徐磊, 杨铮. 电工、电子技术实习与课程设计. 北京: 中国电力出版社, 2006
- [10] 黄利勇. 实用水电安装维修手册. 广东: 广东科技出版社, 1995