

变压器

原理与应用



陈宗穆 编

湖南大学出版社

变压器原理与应用

陈宗穆 编



湖南大学出版社出版发行

(长沙岳麓山)

湖南省新华书店经销 湖南大学印刷厂印刷



787×1092 32开本 12.5印张 280千字

1987年11月第一版 1987年11月第一次印刷

印数 0001—5000册

ISBN 7—314—00170—7/TM·6

统一书号: 15412·38 定价: 3.00元

前 言

变压器是输、变电系统的重要设备。随着我国电力事业的迅速发展，输变电设备大量增加，从事变压器等设备的制造、运行及维护的工人和工程技术人员，迫切需要既有理论阐述，又有实际范例和数据的参考书。《变压器原理与运行》一书，将变压器的基本理论、实际运行和维护等方面的有关知识及问题，融为一体，适合于变压器行业及发电厂、变电所从事变压器制造、运行、维护、检修等工作的工人和技术人员阅读参考，特别适合于作为高压电工的培训教材，也可供工科大专院校有关专业学生阅读参考。本书在出版前曾多次作为长沙电工业余大学高压班的教材，出版时做了较大的修改。

合肥工业大学陆廷信教授审校了全部书稿并提出了许多宝贵的指导性意见，在编写过程中还得到湖南大学姜彦博教授的热情帮助，长沙电业局、长沙电工管理委员会对本书的出版给以大力的支持，长沙变压器厂黄季球工程师提供了新型变压器的有关资料，在此谨表示衷心的感谢。

本书许多论点、经验数据采自书末所附各主要参考文献，在此谨向原作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，缺点错误在所难免，诚恳地希望读者批评指正。

作 者

1987年5月

目 录

前 言

第一章 变压器的基本原理

第一节	变压器的用途	(1)
第二节	变压器的构造	(2)
第三节	变压器的工作原理	(16)
第四节	变压器的运行	(18)
第五节	三相变压器	(26)
第六节	变压器的相量图及等效电路	(30)
第七节	变压器的额定值及铭牌数据	(38)
第八节	国产变压器简介	(41)
	小结	(43)
	习题及思考题	(45)

第二章 变压器的工作性能

第一节	变压器的外特性和电压变化率	(47)
第二节	变压器的调压	(49)
第三节	变压器的损耗与效率	(58)
第四节	标么值	(63)
第五节	变压器参数的测定	(65)
第六节	变压器的发热与冷却	(73)
	小结	(88)
	习题与思考题	(90)

第三章 变压器的连接组和变压器的并联运行

第一节	单相变压器线圈的极性及其测定法	(93)
第二节	三相变压器线圈的连接及连接组	(96)

第三节	变压器的并联运行	(107)
	小结	(120)
	习题和思考题	(121)

第四章 变压器的瞬变过程

第一节	变压器空载投入电网	(124)
第二节	变压器副边突然短路	(128)
第三节	变压器的过电压	(137)
第四节	变压器的过电压保护	(143)
	小结	(150)
	习题及思考题	(151)

第五章 特殊变压器

第一节	三线圈变压器	(152)
第二节	自耦变压器	(160)
第三节	调压变压器	(168)
第四节	互感器	(174)
第五节	交流焊接变压器	(207)
第六节	整流变压器	(209)
	小结	(221)
	习题和思考题	(223)

第六章 变压器的保护

第一节	变压器故障和保护装置的设置原则	(225)
第二节	变压器的瓦斯保护	(228)
第三节	变压器的过电流保护	(232)
第四节	变压器的速断保护	(238)
第五节	变压器的过负荷保护	(241)
第六节	变压器的差动保护	(245)
第七节	变压器的接地保护	(266)
	小结	(274)
	习题和思考题	(274)

第七章 变压器的运行与维护

第一节	变压器的运行要求及投入运行前的检查	(275)
第二节	变压器的操作	(279)
第三节	变压器运行中的巡视与检查	(289)
第四节	变压器油的运行	(291)
第五节	变压器运行中的异常现象及处理	(304)
第六节	变压器常见故障及其原因分析	(308)
第七节	变压器的检修	(312)
第八节	变压器的预防性试验	(339)

第八章 变压器的选择与安装

第一节	变压器的选择	(344)
第二节	变压器的安装	(352)
	小结	(359)
	习题和思考题	(359)

第九章 变压器的节电技术

第一节	从节能观点来看变压器的特性	(360)
第二节	变压器的节电方法	(362)
	小结	(377)
	习题和思考题	(378)

附 录

附录一、S7—50~1600/6~10系列电力变压器技术参数	(380)
附录二、S7—2000~8000/35系列电力变压器技术参数	(380)
附录三、SFS7—10000~40000/110 系列电力变压器技术参数	(382)
附录四、S9—30~1600/10 系列电力变压器技术参数	(382)
附录五、SJ—10~1000/6~10 系列电力变压器的主要技术参数	(384)
附录六、SJ—1000~10000/35	

系列电力变压器的主要技术参数	(396)
附录七、DFS—5600~60000/110	
系列电力变压器的主要技术参数	(396)
附录八、TDGC、TSGC型干式	
自冷接触调压器数据	(398)
附录九、TDJA、TSJA型油浸	
自冷感应调压器数据	(399)
附录十、常用电压互感器技术数据	(401)
附录十一、常用电流互感器技术数据	(402)

第一章 变压器的基本原理

第一节 变压器的用途

变压器是一种静止的电器设备，能将某一电压的交流电能转变为同频率的另一电压的交流电能。

各种不同的用电设备常常需要不同电压的电源。我们日常生活用的电灯、电器的工作电压为 220 伏，安全照明用灯的电压为 36 伏、24 伏或 12 伏；三相交流电动机一般用 380 伏电压，而发电厂的发电机发出的电压一般为 6~10 千伏。通常电能要经过输电线路输送给远距离的用户，为了减少电能的损耗，节省材料，就需要将发电机发出的电压升高到 10、35、110、220、330 千伏等高压或超高压进行远距离输电，这就需要用变压器将电压升高；当电能送到用户区，又必须用变压器将电压降低，以保证用户安全用电，可见变压器是供电系统中一种重要的电气设备。在现代电力系统中，一千瓦的发电容量通常要配用 5~8 千伏安的变压器容量，可见电力变压器的需要量是很大的。

在实际工作中，变压器除了用来变换交流电压外，还用它来变换交流电流（例如电流互感器、大电流发生器等）、变换阻抗（例如电子线路中的输入、输出变压器）、改变相位（改变接线和极性）等。

变压器的种类很多，根据其不同的用途可分为：电力变压器、试验变压器、仪用互感器、电炉变压器、电焊变压器、

调压变压器等。

变压器按其线圈结构可分为：单线圈变压器、双线圈变压器、三线圈变压器及多线圈变压器。

按相数可分为：单相变压器、三相变压器、多相变压器（如可控硅整流设备中的六相变压器）。

按冷却方式可分为：油浸式变压器、干式变压器、充气式变压器等。

按调压方式可分为：无载调压变压器、有载调压变压器。

按中心点绝缘可分为：全绝缘变压器和半绝缘变压器。

虽然变压器的种类很多，但基本结构和基本原理是相同的。

第二节 变压器的构造

变压器的主要部件为一闭合磁路(铁心)以及环绕着磁路的原边电路和副边电路(线圈)。图1—1是油浸式电力变压器

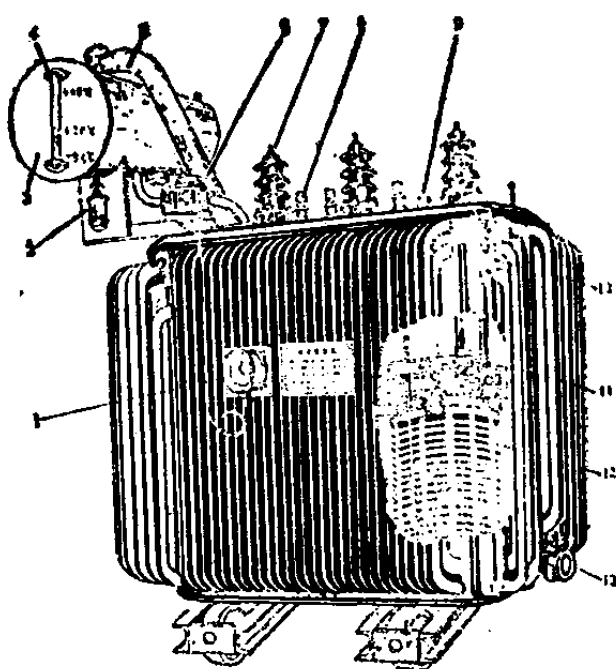


图1—1 油浸式电力变压器

- 1—讯号式温度计
- 2—吸湿器
- 3—储油柜
- 4—油表
- 5—安全气道
- 6—气体继电器
- 7—高压套管
- 8—低压套管
- 9—分接开关
- 10—油箱
- 11—铁心
- 12—线圈及绝缘
- 13—放油阀门

结构示意图。铁心和线圈是变压器进行电磁感应的基本部分，称为器身。此外，还有起机械支撑、冷却散热和保护作用的油箱；起绝缘作用的套管；起冷却和绝缘作用的油等，概括地说，变压器的主要构成部分有：铁心、线圈、油箱和附件、变压器油。现简介如下：

一、铁心

铁心是变压器磁路部分。为了提高磁路的导磁系数和降低铁心的涡流损耗，铁心用彼此绝缘的、厚度为0.35毫米的电工硅钢片叠制而成。铁心分为心柱和铁轭两个部分。铁心柱上套装线圈，铁轭将铁心柱连接起来，使之形成闭合磁路。

根据结构型式和工艺特点，变压器的铁心可分为叠片式和渐开线式两种。

1. 迭片式铁心

迭片式铁心的装配方法一般采用交错式装配，它是把裁剪成一定尺寸、形状的硅钢片交错迭装而成。在迭装时，相邻层的接缝要错开。过去生产的变压器铁心迭装法如图1—2所示。近年来生产的低损耗变压器，铁心材料选用优质冷轧晶粒取向硅钢片，采用45°全斜接缝铁心。迭装方法如图1—3所示，铁心迭片用环氧玻璃丝扎带绑扎（500千伏安以下），或用锰铝合金金属带绑扎（500千伏安及以上）。铁轭也用拉带或拉板固定，因此，空载损耗降低约20~25%。

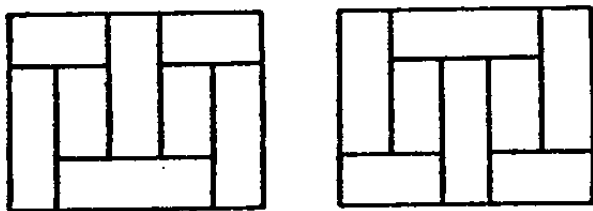


图1—2 三相迭片铁心的迭装次序

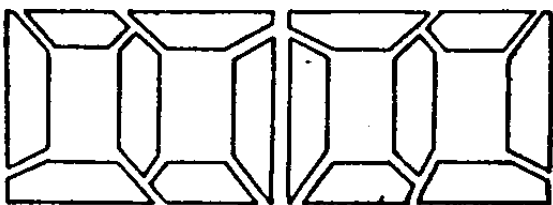


图1—3 冷轧硅钢片的迭装法

为了使线圈便于制造和在电磁力作用下受力均匀以及有较良好的机械性能，一般都把线圈作成圆筒形。为了充分利用线圈内的圆柱形空间，铁心一般作成阶梯形的多边形，如图1—4所示。阶梯的级数愈多，截面愈接近于圆形，空间利用系数愈高，但制造工艺也愈复杂。在实际生产中，铁心柱的级数随变压器容量的增加而增多。在大容量变压器中，为了改善铁心的冷却条件，常在铁心柱中开设油道，以利散热，如图1—5所示。



图1—4 铁芯截面
(a)正方形铁芯；
(b)十字形或两级铁芯；
(c)多级铁芯片

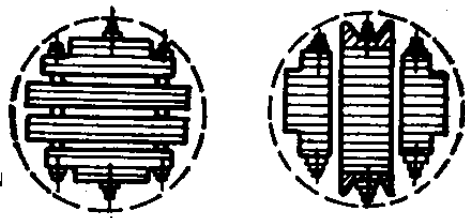


图1—5 铁芯中的油槽
(a)油槽和钢片平行；
(b)油槽和钢片垂直

变压器铁轭的截面有矩形的，也有阶梯形的，如图1—6所示。为了减小变压器的空载电流和铁损耗，在心式铁心中，铁轭截面一般比铁心柱截面大5~10%。在大容量变压器中也有作成相等的。

2. 渐开线式铁心

迭片式铁心存在需要多种尺寸的迭片、制造工艺复杂、装配工序繁多等缺点。为了提高变压器的技术经济指标和劳动生产率，在迭片式铁心的基础上发展了渐开线式铁心。渐开线式铁心仍由铁

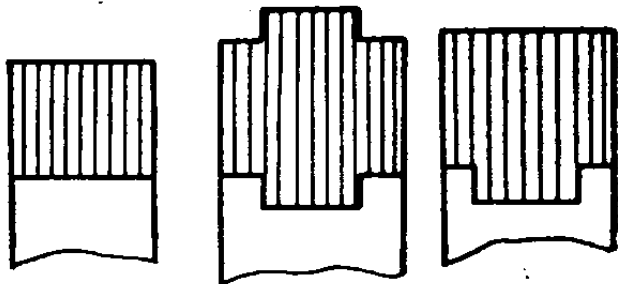


图1—6 铁轭截面的各种形状

心柱和铁轭两部分组成，如图1—7所示。铁心柱是由一种规格的渐开线形状的硅钢片一片一片插装而成为一个圆柱形的

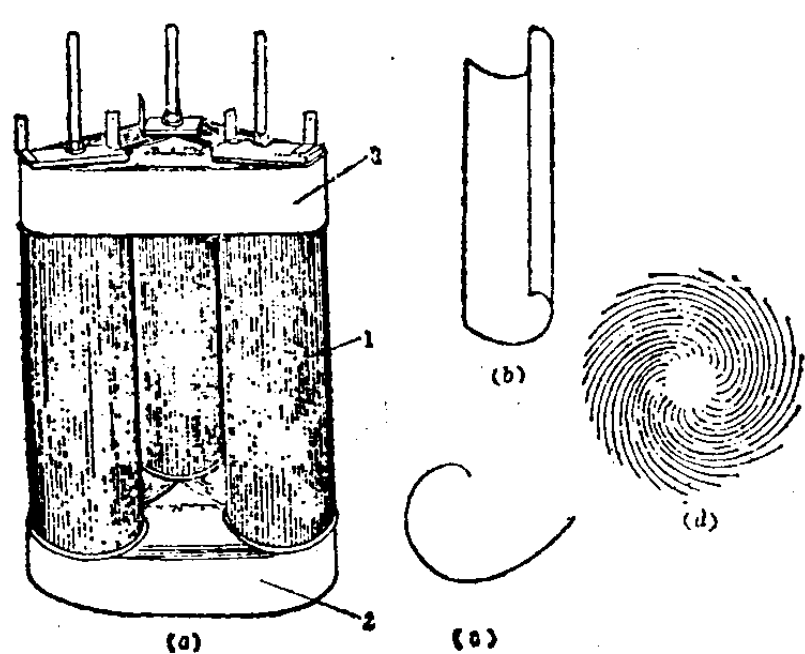


图1—7 渐开线铁心变压器的铁心结构
(a) 铁心结构； (b) 铁心迭片； (c) 渐开线形状； (d) 铁心柱面；
1—铁心柱； 2—铁轭

铁心柱。铁心柱外径与内孔直径之比为4.5~5。这种渐开线形的硅钢片是在专门的成型机上采用冷挤压塑性变形原理一片一片轧制成的。铁轭是由同一宽度的硅钢带卷制成三角形。对于三相变压器来说，渐开线式铁心比迭片式铁心的优点在于三相磁路完全对称，因此，铁轭中的磁通量只有铁心柱中磁通量的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ，相应地铁轭的截面积也只有铁心柱截面积的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 。所以渐开线式铁心的最大优点是节省硅钢片。

二、线圈

线圈是变压器的电路部分，一般采用绝缘纸包的铜线或铝线绕成。为了节省铜材，我国变压器线圈大部分采用铝线。

变压器中，接到高压电网的线圈称为高压线圈，接到低压电网的线圈称为低压线圈。按照线圈在铁心上的排列方式来分类，变压器可以分为铁心式和铁壳式两种，如图1—8所示。图1—9为铁心式变压器的剖面图和同心式圆筒形线圈，（a）为单相；（b）为三相。由图可见，每个铁心柱上都有低压线圈和高压线圈，低压线圈靠近铁心柱，高压线圈则

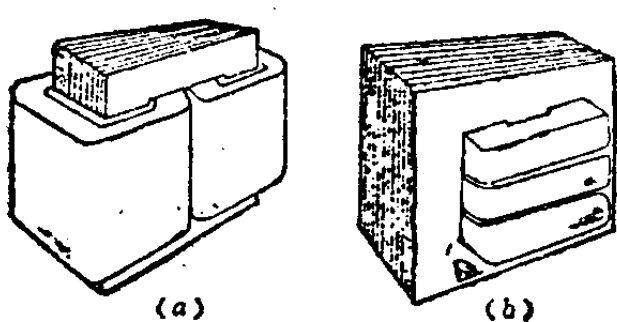


图1—8 小型变压器外形
(a) 铁心式;
(b) 铁壳式

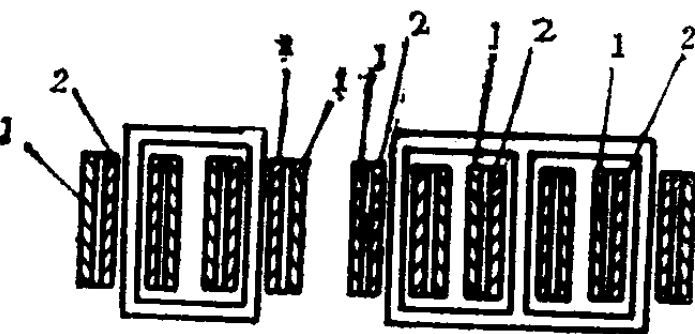


图1—9 同心式圆筒形线圈
(a)单相变压器; (b)三相变压器
1—高压线圈; 2—低压线圈

套在低压线圈外面。对于三相变压器，每一铁心柱上的低压线圈和高压线圈属于同一相。对于单相变压器，低压线圈和高压线圈各分为两部分，分别排列在两边的铁心柱上。图1—10所示为一单相铁壳式变压器的剖面。这种变压器的铁心柱在中间，磁轭在两边环绕，且把线圈包围起来。铁心式变压器的优点是制造工艺比较简单，高压线圈和铁心间的绝缘较易。铁壳式变压器的优点是结构比较坚固，缺点是制造工艺复杂，线圈与铁心间的绝缘也比较困难。因此，应用于电力系统中的各种变压器一般都采用铁心式。

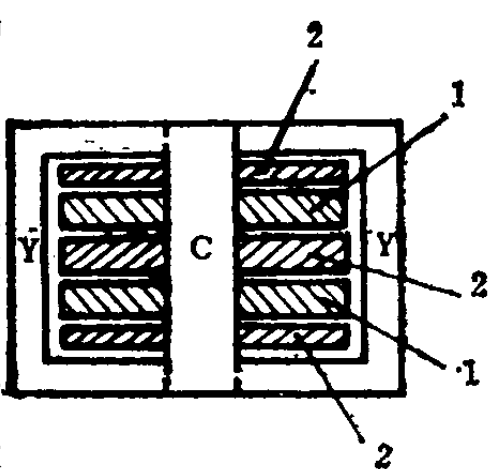


图1—10 交迭式线圈
1—高压线圈;
2—低压线圈

铁壳式变压器通常应用于电压很低而电流很大的特殊场合，

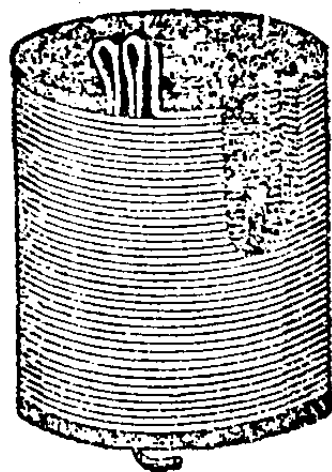
例如电炉用变压器。

按高、低压线圈之间的相对位置来分类，变压器线圈有同心式线圈和交迭式线圈两种。铁心式变压器常用同心式线圈；铁壳式变压器常用交迭式线圈。如图1—8(a)和图1—9所示，同心式线圈的高压线圈和低压线圈，制成圆筒形式，然后同心地套在铁心柱上。把低压线圈套在里层，把高压线圈套在外层是为了便于绝缘。交迭式线圈又称饼式线圈。如图1—8(b)和图1—10，高压线圈和低压线圈各分为若干线饼，沿着铁心柱的高度交替地排列着。为了排列得对称起见，也为了使高压线圈能够离开磁轭远一些以便于绝缘，图1—10中的高压线圈分为两个线饼，低压线圈则分为一个线饼和两个“半线饼”。靠近上下磁轭处的线饼为低压“半线饼”，其匝数为位于中间的低压线饼的匝数的一半。交迭式线圈主要用于铁壳式变压器，故应用不多。铁心式变压器应用同心式线圈，是电力变压器的主要结构形式。

根据线圈绕制的特点，线圈可以分为圆筒式、饼式、连续式、纠结式和螺旋式等几种主要形式。

1. 圆筒式线圈

圆筒式线圈是最简单的一种线圈形式，它是由一根或几根并联的绝缘导线沿铁心柱高度方向连续绕制而成，一般用于10~630千伏安三相变压器的高压或低压线圈。用作高压线圈时，由于电压较高，电流较小，导线细，匝数多，通常采用圆线绕成多层圆筒式线圈。如图1—11所示。



为了便于线圈内部散热，当层数较

图1—11 多层圆筒式线圈

多时，中间开设轴向油道。用作低压线圈时，因电压较低，电流较大，导线截面大，匝数少，通常用扁形线绕成单层或双层圆筒式线圈。在双层圆筒式线圈中，有时在层间也开设轴向油道。

2. 饼式线圈

饼式线圈是由一根或几根并联的绝缘扁导线沿铁心柱的径向一匝接着一匝地串联绕制而成的，数匝成为一饼。饼间开设径向油道以利于散热。通常以两饼作为一个单元一次绕成，中间无接头，叫双饼式，一般用于壳式变压器中，如图1-12所示。

3. 连续式线圈

连续式线圈是由很多个如前面所述的线饼沿轴向串联绕成的。在绕制时，先是若干匝沿径向串联绕成一个线饼，然

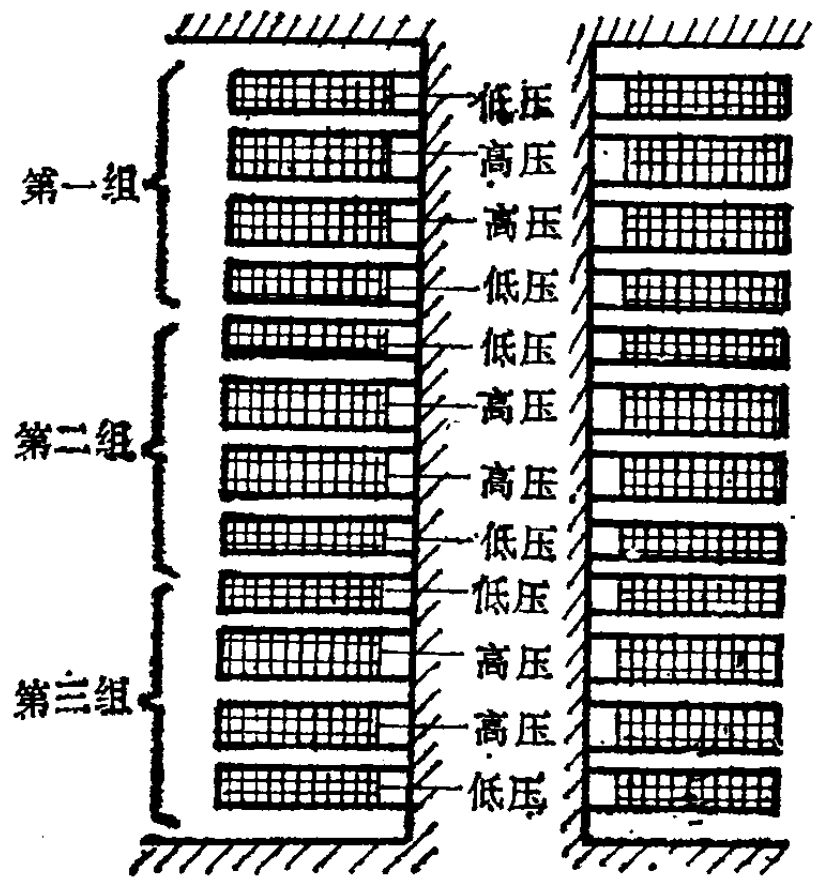


图1-12 交迭饼式线圈

后采用特殊的“翻绕法”使绕制连续地过渡到下一个线饼。线饼之间没有焊接头，如图1-13所示。连续式线圈一般用于

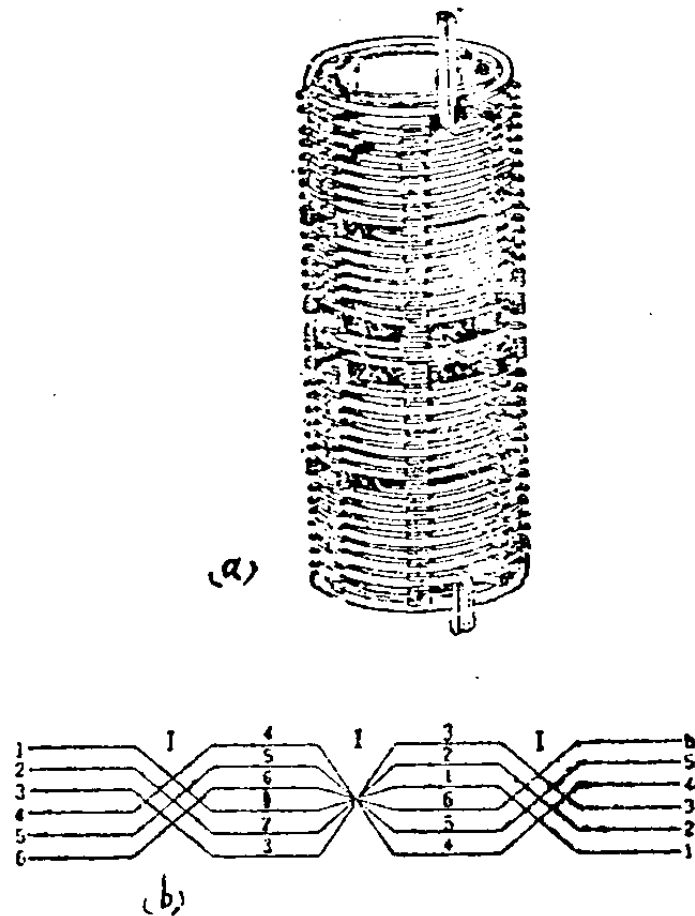


图1—13 连续式线圈
(a) 外形图； (b) 连接图

三相容量为 630 千伏安及以上、电压为3~110千伏的线圈。

4. 纠结式线圈

纠结式线圈的外形与连续式线圈相似，但焊接头较多。这种线圈线匝不是依次排列的，而是前后纠结在一起，这样做的目的在于使过电压时的起始电压比较均匀地分布于各线饼之间，当线圈由一根导线组成时，先用两根导线并绕，再交叉串联成一路，如图1-14所示。这时两个线饼为一单元，各单元之间再依次串联起来。这种线圈用于大容量变压器的

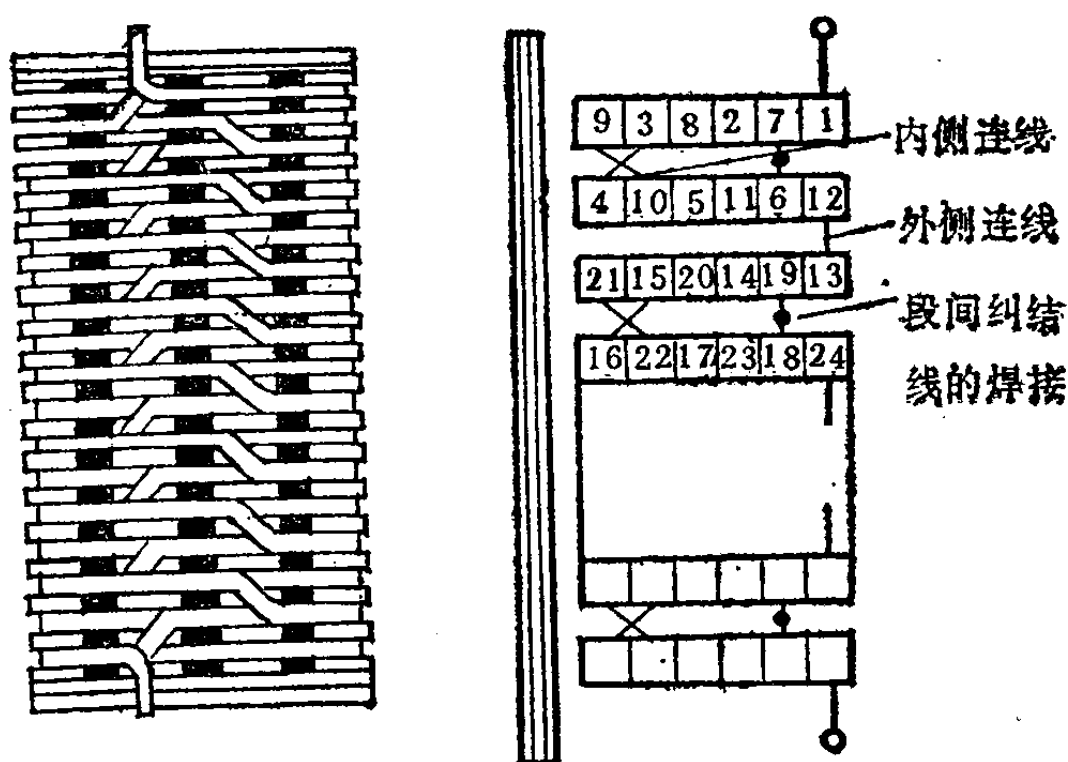


图1-14 纠结式线圈 (a)外形图; (b)接线图

高压线圈。一般用于三相容量为6300千伏安及以上、电压为10~330千伏的线圈。

5. 螺旋式线圈

螺旋式线圈是由多根扁线沿径向并联排列，然后沿铁心柱轴向高度象螺纹一样，一匝跟着一匝地绕制而成，如图1-15所示。这时一个线饼就是一匝。为了减少导线中的附加损耗，绕制过程中将导线进行换位。这种线圈一般用于三相容量为800千伏安以上、电压为35千伏及以上的大电流线圈。

低损耗变压器的线圈在结构上有其特点：采用瓦楞油道代替撑条油道，线圈不浸漆处理，而用环氧玻璃丝带或锰铝合金带绑扎，低压线圈出线端采用加强措施相对固定，引线采用平行引出。此外，还加大铁心直径与铁心窗高之比，使低损耗变压器能有更强的承受突然短路和过电压波冲击的能