

# 变压器铁心制造

沈阳变压器研究所编

本书主要是根据国内变压器铁心的生产实践编写的。内容包括变压器铁心发展概况、铁心的结构和计算、硅钢片的品种和性能以及铁心片的冲剪加工、退火涂漆和装配等工艺。

本书可供从事变压器制造和维修的工人、技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

## 变压器铁心制造

沈阳变压器研究所 编

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  · 印张  $6 \frac{1}{2}$  · 字数 140 千字

1983 年 7 月北京第一版·1983 年 7 月北京第一次印刷

印数 00,001-10,500 · 定价 0.83 元

\*

统一书号: 15033·5504

## 前 言

为了适应我国变压器行业的迅速发展和满足广大电工行业的工人、工程技术人员需要,结合我国变压器生产实践,我所组织编写了《变压器铁心制造》这本书。

编写过程中,我们力求理论联系实际,在关键部分,通过实例加以说明,并引用大量插图及照片,使其内容更加清晰、明了。同时,书中也引用了国内外变压器制造业近年来所采用的新的铁心结构、工艺和工装设备,以供借鉴。

书中所引用的资料、表格、数据大多数取自国家标准、专业标准及工厂标准。

本书第一、二、三章及附录部分由韩忠民同志执笔,第四章由鲁殿国同志执笔,第五、六章由鲁永久同志执笔,全书由邢如励、郑时伊两同志审查修改。

本书在编写过程中,得到沈阳变压器厂等单位的支持和帮助,在此表示感谢。由于我们业务水平不高,书中错误和不足之处在所难免,希望广大读者批评指正。

# 目 录

第一章 变压器铁心发展概况 .....	1
1. 铁心结构的发展 .....	1
2. 铁心材料的发展 .....	3
3. 铁心制造工艺的发展 .....	5
第二章 变压器铁心的结构 .....	6
一、铁心的分类及磁通分布 .....	6
1. 铁心的用途 .....	6
2. 铁心的分类 .....	7
3. 铁心的截面及磁通分布 .....	12
二、铁心的结构 .....	17
1. 铁心的对接和搭接 .....	18
2. 铁心的叠积图和接缝形式分析 .....	19
3. 心柱和铁轭的截面 .....	26
4. 铁心的紧固结构 .....	30
5. 铁心的接地结构 .....	38
三、铁心的温升与散热 .....	39
1. 铁心温升标准 .....	39
2. 铁心截面上的温升计算 .....	40
3. 铁心的散热结构 .....	49
四、铁心结构的强度计算 .....	50
1. 扭紧螺杆时产生的夹紧力 .....	51
2. 心柱夹紧结构的强度计算 .....	51
3. 夹件的强度计算 .....	53
4. 方铁的强度计算 .....	59
5. 铁轭螺杆的强度计算 .....	62

6. 线圈压板和压钉的强度计算 .....	63
7. 下夹件上肢板的应力计算 .....	64
8. 铁心结构设计中应注意的一些问题 .....	65
<b>第三章 变压器用的硅钢片 .....</b>	<b>67</b>
一、硅钢片的织构 .....	68
二、硅钢片的品种 .....	70
三、硅钢片的电磁性能 .....	74
1. 硅钢片电磁量的实用单位及其间的换算关系 .....	74
2. 硅钢片的电磁曲线 .....	77
3. 硅钢带(片)工频电磁性能的测试方法 .....	84
四、硅钢片的物理和机械性能 .....	85
1. 硅钢片的物理性能 .....	85
2. 硅钢片的机械性能 .....	88
<b>第四章 变压器铁心片的冲剪加工和设备 .....</b>	<b>90</b>
一、冲剪加工对铁心片电磁性能的影响 .....	90
1. 变压器铁心的电磁性能 .....	90
2. 硅钢片剪切边缘的加工硬化 .....	94
3. 硅钢片冲孔的影响 .....	95
4. 横向夹紧和弯曲对硅钢片电磁性能的影响 .....	96
5. 辊压毛刺的影响 .....	98
6. 硅钢片退火对电磁性能的改善 .....	99
二、铁心片冲剪加工的质量要求 .....	100
三、卷料硅钢片的纵向剪切和设备 .....	102
1. 纵向剪切加工的特点 .....	102
2. 纵向剪切力的计算 .....	105
3. 纵向剪切设备 .....	107
4. 纵向剪切生产线 .....	113
四、硅钢片的横向剪切和设备 .....	117
1. 横向剪切加工的特点 .....	117

## VI

2. 横向剪切力的计算 .....	121
3. 横向剪切线的形式 .....	122
4. 横向剪切线的送料和定位 .....	125
5. 横向剪切线的自动控制 .....	126
6. 横向剪切生产线的设备 .....	130
7. 国内外几种横向剪切生产线介绍 .....	136
五、常用的刀具和模具 .....	143
1. 圆盘剪刀 .....	143
2. 直剪刀 .....	146
3. 冲模 .....	146
第五章 铁心片退火涂漆的工艺及设备 .....	149
一、铁心片的退火工艺 .....	149
1. 退火工艺的目的 .....	149
2. 成品铁心和成堆铁心片的退火 .....	149
3. 单片连续式退火 .....	150
4. 退火的防护措施和保护气体 .....	151
二、钟罩式及釜车式硅钢片退火炉 .....	153
1. 退火炉的结构 .....	153
2. 热元件的布置 .....	155
3. 温度的控制 .....	155
4. 应注意的问题 .....	155
三、连续式退火炉 .....	155
1. 退火炉的结构 .....	156
2. 热元件的布置 .....	161
3. 温度的控制 .....	161
4. 应注意的问题 .....	161
四、铁心片的涂漆工艺 .....	162
1. 涂漆的目的 .....	162
2. 涂漆的方法 .....	162

3. 绝缘漆的选择 .....	162
4. 涂漆的质量要求 .....	162
5. 漆膜绝缘电阻的测量 .....	163
五、铁心片涂漆干燥炉 .....	165
第六章 铁心的装配 .....	168
一、铁心片号的管理和准备 .....	168
二、铁心的叠装工艺 .....	169
1. 铁心叠装工作位置的合理布置 .....	169
2. 铁心叠装的工艺过程 .....	169
3. 铁心叠装应注意的问题 .....	175
三、卷铁心的卷制和装配 .....	176
1. 卷在线圈上的卷铁心 .....	176
2. 单相、三相立体式和三框式卷铁心 .....	177
3. C型、Y型和E型卷铁心 .....	178
4. 二匝、单匝叠接式及三框叠接式卷铁心 .....	179
5. 半卷式铁心 .....	180
四、铁心用玻璃粘带扎紧工艺 .....	180
1. 环氧玻璃粘带的配制 .....	180
2. 用玻璃粘带扎紧铁心的方法 .....	180
3. 玻璃粘带的干燥 .....	183
五、叠装大型铁心的滚转台 .....	184
1. 60吨双钩起立铁心叠装滚转台 .....	184
2. 装配式大型单钩起立铁心叠装滚转台 .....	185
3. 采用油压机升降叠装平台和双钩起立滚转台 .....	185
4. 40吨液压铁心叠装滚转台 .....	186
5. 苏联的大型铁心叠装台 .....	187
六、铁心的试验 .....	189
附录 .....	190
附表1 变压器铁心截面各级参考尺寸 .....	190

附表 2. 铁心夹件的截面系数 .....194

附表 3 常用冷轧硅钢片电磁性能参考数据 .....196

附表 4 冷轧硅钢片接缝磁化容量参考数据 .....198

附表 5 国外冷轧硅钢片电磁性能 .....198



# 第一章 变压器铁心发展概况

变压器从发明到现在已有一百余年的历史，虽然原理并没有改变，但无论在结构、材料和工艺上均有了很大的发展。

## 1. 铁心结构的发展

世界上第一台具有闭合磁路铁心的单相变压器是1885年制造出来的<sup>⊖</sup>，并于1887年在单相交流输变电系统中得到正式采用。这种最初单相变压器铁心如图1-1 a、b所示，是用铁丝绕成且是平放的。图1-1 a为空心圆环型铁心，它绕在线圈的外面，其空心的部分为线圈；图1-1 b为实心方型铁心，这和一般的型式一样，它的外面绕制线圈。不久之后，变压器铁心改由普通钢片制造，如图1-1 c所示。

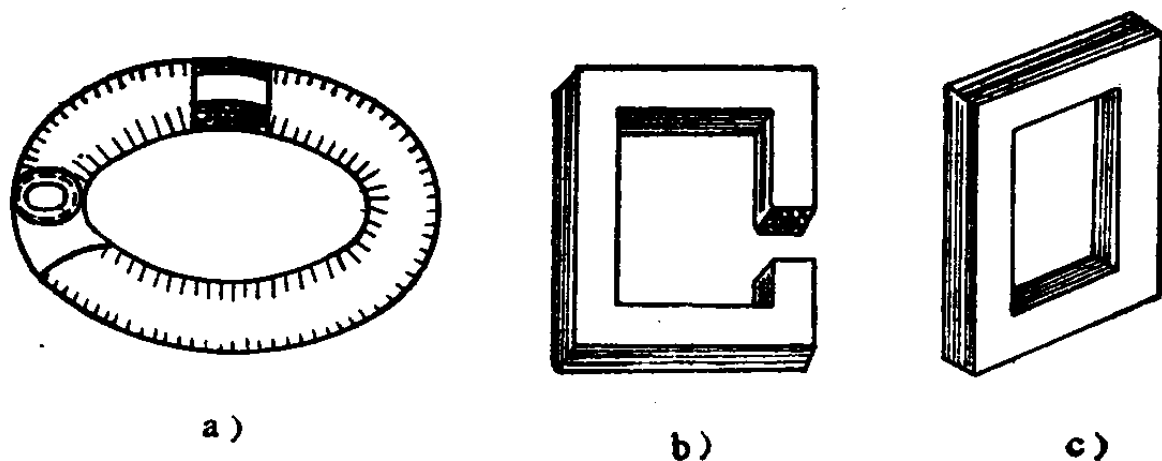


图1-1 早期的单相变压器铁心

a) 空心铁丝绕制圆环型    b) 实心铁丝绕制方型    c) 实心钢片叠铁心

<sup>⊖</sup> 由匈牙利冈茨工厂提出和制造的。

当人们得知三相交流电优点很多、使用方便时，出现了三相变压器，三相铁心如图 1-2 所示。开始的三相铁心是由三个如图 1-1 c 所示的单相铁心组合而成。它们互成  $120^\circ$  放置，形成辐射式铁心(图 1-2 a)。但这样的铁心在任何瞬间三相电流之和为零，所以在中心三根心柱中，任何瞬时的磁通之和也为零，因而可以简化为如图 1-2 b 所示的三相棱型铁心(Y型)。随后，为了使结构切实可行，则过渡到图 1-2 c 所示的三相平面式铁心。

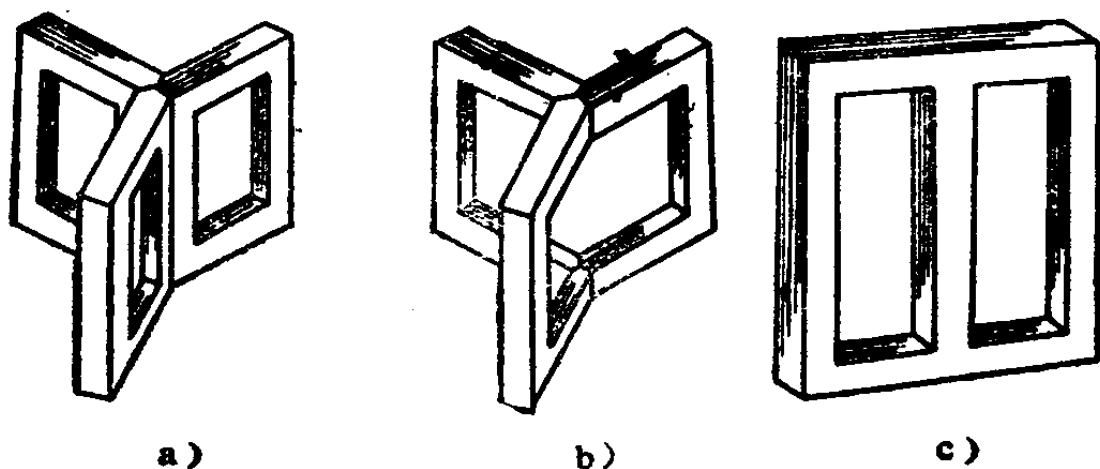


图1-2 三相变压器铁心的过渡型式

a) 辐射式 b) 棱型 c) 平面式

三相平面式铁心的中柱磁通经两边柱闭合，磁路较短，所需励磁电流比两个边柱稍小些，其不平衡度并不妨碍变压器的运行，而对铁心装配甚为方便，且紧凑结实，故一直延至今日，仍被广泛采用。

三相平面式铁心虽然在变压器发展的早期就已形成了，但近几十年来在具体结构上仍有相当大的变化。铁心的接合面由整体对接改为分片搭接，提高了性能，增加了可靠性。铁心片的接缝由直角改为斜角，以适应冷轧硅钢片的性能。铁心由螺杆夹紧改为玻璃粘带或金属带扎紧，减少了损耗，缩

小了体积，从而发展成现代的搭接、全斜、绑扎的大型变压器铁心。图 1-3 为我国制造的大型变压器铁心。

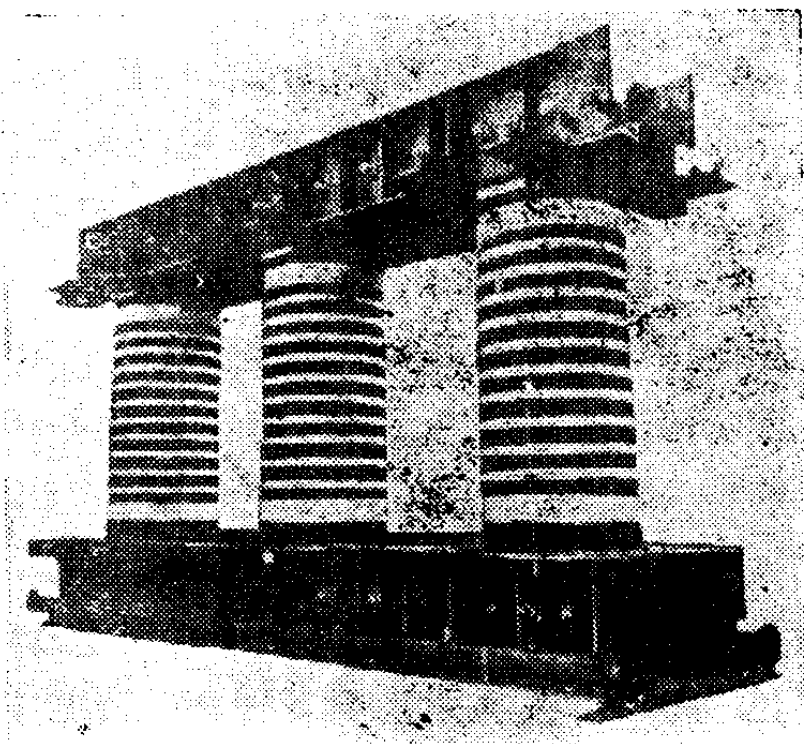


图1-3 现代大型变压器铁心

随着变压器容量的增大、电压的增高，在铁心结构上又发展了单相四柱和三相五柱铁心。

随着卷料硅钢片的出现，又出现了许多卷铁心，其中还包括渐开线铁心。

## 2. 铁心材料的发展

在二十世纪前，变压器铁心是用普通钢片制造的。本世纪初以来，出现了硅钢片并不断改善了硅钢片的性能，促使变压器有了更迅速的发展。

硅钢片的发展大体可分为三个阶段。

在 1900 年英国人哈特菲尔德 (Hadfield) 发现，若在铁中加入 2.5% 硅，则这硅钢的软磁性能可得到明显提高。1903 年德国和美国开始生产硅钢片，1905 年美国有了硅钢片商品，1906 年英国也生产了 1 吨含硅为 3.25% 的硅钢片，

从此硅钢片就越来越多地被应用于电工产品上。后又经多次改进，硅钢片的铁损大为降低，其中以美国阿姆柯钢铁公司 (Armco steel corp) 的产品为最好，它于 1925 年把铁损  $P_{15/50}$  (0.35 毫米) 降低到 3.1 瓦/公斤。但以后直至 1950 年，铁损降低无明显改进， $P_{15/50}$  (0.35 毫米) 仅降为 2.82 瓦/公斤。人们试验提高含硅量，但含硅量达 4.5% 时，已极不利于机械加工。这一时期是热轧硅钢片的发展阶段。

1934 年美国高斯 (Goss) 经过多次冷轧退火，获得具有方向性的冷轧硅钢片，沿轧制方向导磁率进一步提高，损耗进一步降低，而且平整度好，为改进质量提出了方向。这种冷轧硅钢片尤其适用于制造变压器铁心。美国阿姆柯公司于 1935 年生产了冷轧硅钢带，1942 年已用于制造小型变压器卷铁心上，1952 年后大量用于各种变压器上。这种冷轧硅钢片的单位铁损  $P_{15/50}$  (0.35 毫米)，目前最好的已降低到 1.0 瓦/公斤。这是硅钢片发展的第二阶段，即冷轧硅钢片阶段。

1968 年，日本新日铁公司由于在硅钢片上采用了特殊的无机绝缘涂层 (磷、硅酸镁层，S 级)，使取向冷轧硅钢片在高磁场时沿轧制方向导磁率更高、铁损更低，且磁致伸缩小。因此，这种新的取向硅钢片称为高导磁 (Hi-B) 硅钢片，其单位铁损  $P_{15/50}$  (0.35 毫米) 降低到 0.93 瓦/公斤，约比最好的普通取向冷轧硅钢片降低了 10%；在常用磁通密度下导磁率增加了 3.5 倍，因而可使工作磁密选取到 18000 高斯。现在这种高导磁冷轧硅钢片已广泛地用于变压器上，1975 年以后世界上大型变压器多用高导磁硅钢片制造铁心，进一步缩小了体积，减轻了重量。这就是硅钢片发展的第三个阶段，即高导磁冷轧硅钢片阶段。

我国目前已能生产上述各种性能良好的硅钢片，包括高导磁硅钢片。

在铁心绑扎材料上，我国目前多采用无碱玻璃丝带浸环氧树脂，其固化后的拉断强度可超过 3000 公斤/厘米<sup>2</sup>。

### 3. 铁心制造工艺的发展

因为硅钢片由热轧板料改为冷轧卷料，铁心片的冲剪加工已不采用单台剪床、冲床，而改用纵向剪切和横向剪切的生 产线，大大提高了生产效率，改进了加工质量。

在大型铁心叠装时已采用了液压叠装平台，改善了劳动条件，提高了生产效率和叠装质量。

玻璃粘带绑扎可用机械操作，也可预先制造成型件再进行扎紧。

为了改善取向冷轧硅钢片的性能，消除加工后的影响，退火工艺已由箱式退火炉发展成连续式退火炉。

由于硅钢片性能、铁心结构以及制造工艺的发展和提高，国内外在中、大型变压器铁心制造方面的发展趋向是“五不”：即不压毛刺、不退火、不涂漆、不冲孔和不叠上铁轭。当然要作好“五不”，就必须在工艺方法、专用设备及工装模具方面采取许多措施才行。

## 第二章 变压器铁心的结构

### 一、铁心的分类及磁通分布

#### 1. 铁心的用途

变压器是利用电磁感应原理制成的静止电器，铁心和线圈是变压器的两大部分。线圈是电的回路，以通过电流；铁心是磁的回路，以流过磁通，靠交变磁通的感应和线圈不同的匝数，变压器才能起到变压输电的作用。因此没有铁心，变压器是不能工作的。如图 2-1 所示，铁心中套线圈的部分称“心柱”，不套线圈只起闭合磁路作用的部分称“铁轭”。

铁心是由导磁材料制成的框形闭合结构。为了减少涡流损耗，变压器铁心由很薄的附有绝缘层的硅钢片叠积或卷绕而成。

变压器用的硅钢片

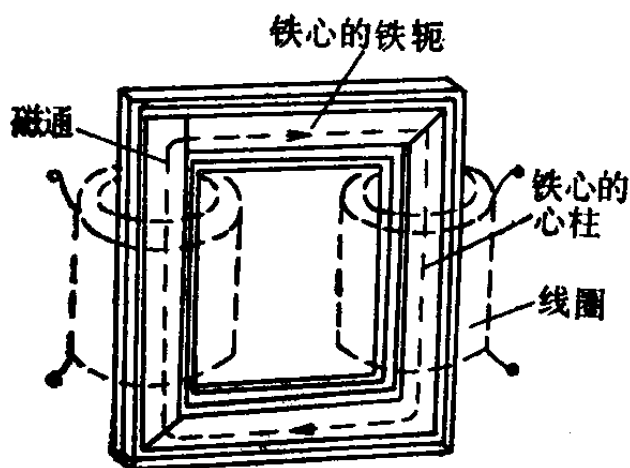


图2-1 变压器工作原理图

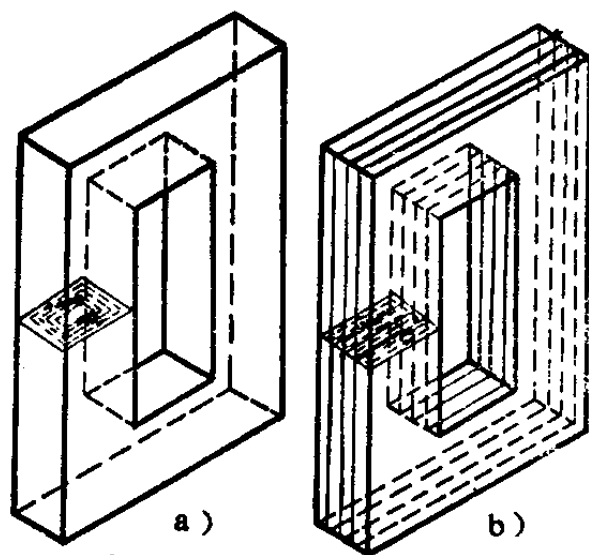


图2-2 铁心中的涡流损耗

a) 整块的铁心 b) 叠积的铁心

一般采用 0.35 毫米厚, 太厚性能就不好了。厚度增大 1 倍, 涡流损耗增大 4 倍, 如图 2-2 所示。

另外, 铁心要具有良好的结构, 以起到支撑线圈、绝缘件和引线的作用。

## 2. 铁心的分类

变压器铁心的结构决定于它的型式、导磁材料的质量以及制造工艺水平。铁心的分类没有统一的方法, 任何分类方法, 均不可能包括全部的结构型式, 通常的分类如下。

### (1) 壳式和心式铁心

通常壳式铁心是水平放置的, 铁心截面为矩形, 每柱有二旁轭, 铁心包围了线圈, 所以称壳式, 如图 2-3 所示。这种铁心的铁心片规格少, 且不需任何冲孔和切口; 心柱截面大而长度短; 铁心紧固方便;

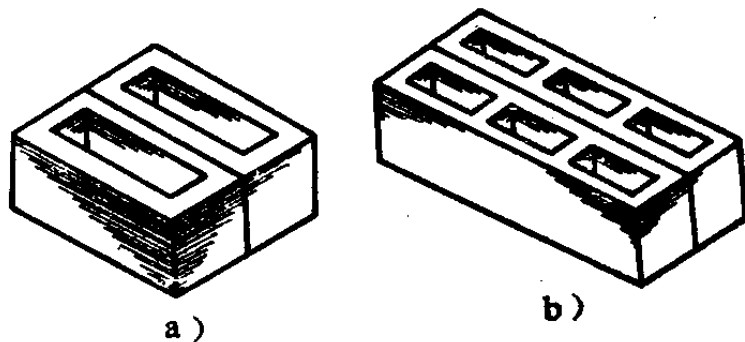


图2-3 典型的壳式变压器铁心

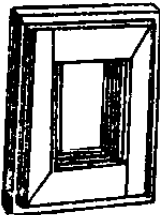
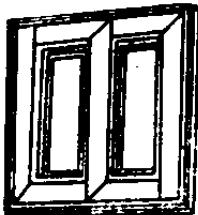
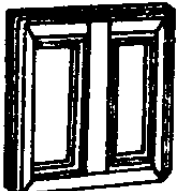
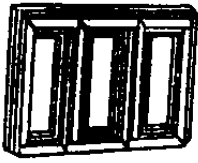

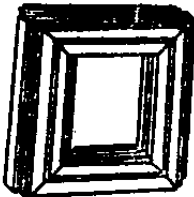
a) 单相的 b) 三相的

漏磁通有闭合回路, 附加损耗小。但其矩形线圈制造困难, 绝缘结构比较复杂, 短路时线圈易变形, 另外硅钢片用量相对多些。

通常心式铁心是垂直放置的, 铁心截面多为分级圆柱形, 线圈包围心柱, 所以称心式。叠片规格较多, 绑扎和夹紧要求较高。但圆形线圈制造方便, 短路时稳定性好, 硅钢片用量也较少。常用的心式叠铁心的结构特征和适用范围见表 2-1。

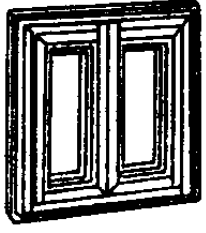
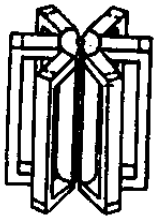
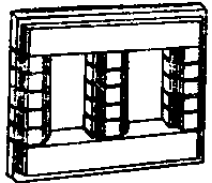
壳式和心式这二种结构各有特色, 很难断定其优劣, 但

表2-1 常用的心式叠铁心结构特征和适用范围

种类	型式	图 形	结 构 特 征	适用范围
1	单相 二柱式 叠铁心		心柱与铁轭在同一垂直平面内，以交叠方式叠积，两柱均套线圈，以串、并联接线引出。结构简单而紧凑，工艺装备少，但叠积工作量大。它是广泛应用的基本结构	适用于单相的各种变压器和互感器
2	三相 三柱式 叠铁心		在结构上，与第1种是同一类型，只是多了一个心柱。三柱线圈各自为一相引出。它是三相变压器最广泛应用的典型结构	适用于三相的各种变压器
3	单相 单柱旁 轭式叠 铁心		中间为一个心柱、二边为旁轭、轭的截面为心柱截面的 $\frac{1}{2}$ ，可使上、下轭高度降低，有助于减少附加损耗，但用硅钢片多些。它实际上是单相壳式结构	适用于低电压大电流变压器、高压试验变压器等
4	单相 二柱旁 轭式叠 铁心 (四柱 铁心)		中间为二个心柱，二边为旁轭，可使上、下轭降低，轭截面为心柱的 $\frac{1}{2}$ 。常用于大容量单相变压器中，有时在旁轭上套装调压和励磁线圈。它是第1种的派生结构	适用于高压大容量单相变压器
5	三相 三柱旁 轭式叠 铁心 (五柱 铁心)		中间为三个心柱，二边旁轭和上、下轭截面为心柱的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 。常用于大容量三相变压器中。另外，三相三线圈电压互感器必须要有旁轭，以作单相接地时零序磁通回路	适用于三相大容量变压器、三相三线圈电压互感器等
6	单相 双框式 叠铁心		和第1种的结构是相似的，只是铁心最大级宽度很大时，把铁心分成截面相等的内外两框构成，框间形成横向油道、提高冷却效果	适用于大容量单相变压器



(续)

种类	型式	图 形	结 构 特 征	适用范围
7	三相 双框式 叠铁心		和第2种的结构是相似的,是由截面相等的一个外框和二个内框构成,但中间心柱两端内外框有半数叠片连在一起,以满足磁通合理分布的要求	适用于大型三相变压器
8	单相 辐射式 叠铁心		心柱叠片排列成辐射状,旁轭沿心柱圆周径向对装。这种结构更可降低铁轭高度,减少附加损耗,并可采用圆形油箱,以减小变压器体积,但制造费工时。它是一种特殊结构	适用于高压并联电抗器
9	三相 电抗器 叠铁心		和第2种的结构是相似的,只是其心柱分段,由气隙隔开,以增大电抗。它是铁心电抗器的基本结构	专用于三相电抗器

是由铁心结构所决定的变压器制造工艺则大有区别,一旦选用了某一种结构,就很难转而生产另一种结构。

应该指出,这样划分铁心结构不一定很恰当。实际上,表2-1中第3、8种铁心尽管它们是垂直的心柱和圆形线圈,但从磁路上看它们都是壳式铁心。不过,习惯上仍从线圈绕制工艺出发,把这两种铁心划入了心式铁心之列。

## (2) 单相和三相铁心

单相铁心如表2-1中第1、3、4、6、8的五种铁心。另外,高压大容量变压器为了进一步降低铁心高度,采用单相二柱三框式和单相三柱四框式,如图2-4所示。实际上,它们就是表2-1中的第4、第5种铁心。

三相铁心就是表2-1中第2、5、7、9的四种铁心。三相