

常用符号表

A ——面积	P_0 ——空载损耗
A_D ——单根导线截面	P_H ——附加损耗
A_E ——铁轭有效截面	P_{js} ——结构损耗
A_X ——铁心有效截面	P_r ——直流电阻损耗
A_Z ——铁柱有效截面	P_s ——短路损耗
a ——两中心间距离	P_z ——总损耗
a_Z ——铁柱中心距	p ——单位损耗
B ——磁通密度	Q ——无功功率
B_B ——磁轭磁通密度	q ——单位面积热负载, 单位激磁容量
B_X ——铁心磁通密度	R, r ——电阻, (外、内) 半径
B_Z ——铁柱磁通密度	r_0 ——激磁电路的等值电阻
b ——宽度	S ——容量(视在功率)
b_X ——油箱宽度	S_Z ——变压器每柱容量
C ——热容量, 电容	T ——周期, 绝对温度
$\cos\varphi$ ——功率因数	t ——时间
D, d ——(外、内) 直径	U, u ——(有效值、瞬时值) 电压
D_Z ——铁柱直径	U_r ——电阻电压
E ——电场强度, 弹性模数	U_x ——电抗电压
E, e ——(有效值、瞬时值) 感应电势	U_s ——阻抗电压
E_2 ——匝电势	U_ϕ ——相电压
F ——力, 磁势	u_r ——电阻电压百分数
f ——频率, 比值差	u_x ——电抗电压百分数
G ——重量	u_s ——阻抗电压百分数
H ——磁场强度	V ——体积
h ——高度	X, x ——电抗
h_X ——两线圈净高度平均值	x_0 ——激磁电路的等值电抗
I, i ——(有效值、瞬时值) 电流	Y, y ——导纳
I_0, i_0 ——空载电流, 激磁电流	Z, z ——阻抗
I_{0a}, i_{0a} ——空载电流有功分量, 损耗电流	z_0 ——激磁电路的等值阻抗
I_{0r}, i_{0r} ——空载电流无功分量, 磁化电流	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$ ——平面角
I_ϕ ——相电流	$\Delta\theta_{M-K}$ ——油箱顶层油对空气的温升(简称油面温升)
j ——电流密度	$\Delta\theta_{Q-K}$ ——线圈对空气的平均温升(简称线圈温升)
K ——电压(电流)比	$\Delta\theta_{Q-Y}$ ——线圈对油的平均温升
K_{fs} ——附加损耗系数	$\Delta\theta_{Y-K}$ ——油对空气的平均温升
K_{Rh} ——横向洛氏系数	δ ——厚度, 相角差
K_{RZ} ——纵向洛氏系数	η ——效率
K_{xy} ——自耦变压器效益系数	θ ——温度
K_{wl} ——涡流损耗系数	μ ——磁导率
L ——电感	ρ ——电阻率
l ——长度	τ ——时间常数
l_x ——油箱长度	φ ——相角
M ——力矩, 互感	ϕ ——磁通
N ——线圈匝数	ϕ_s ——铁心主磁通
P ——有功功率	ω ——角频率

第1章 变 压 器

1 概 述

1.1 用途和分类

电力的经济输送、分配与安全使用，需要升高或降低电压；变压器就是根据这种需要，利用电磁感应原理制成的一种电器。

变压器一般分电力变压器和特种变压器两大类。电力变压器是电力系统中输配电力的主要设备。按用途分类，电力变压器可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器、联络变压器（联接几个不同电压等级的电网用）和厂用电变压器（供发电厂自用电用）等几种。它还可以按线圈数、相数、冷却方式以及调压方式等分类，如表25·1-1。特种变压器是根据冶金、矿山、化工、交通等部门的不同要求，提供各种特种电源或作其它用途。主要的特种变压器的用途和分类如表25·1-2。

表25·1-1 电力变压器的分类和型号

型号中代表符号排列顺序	分 类	类 别	代表符号
1	线圈耦合方式	自 耦	O
2	相 数	单 相 三 相	D S
3	冷却方式	油浸自冷 干式空气自冷 干式浇注绝缘 油浸风冷 油浸水冷 强迫油循环风冷 强迫油循环水冷	J G C F S FP SP
4	线圈数	双线圈 三线圈	— S
5	线圈导线材质	铜 铝	— L
6	调压方式	无载调压 有载调压	— Z

表25·1-2 主要的特种变压器的用途和分类

名 称	用 途	特征型号
整流变压器 附平衡电抗器	交直流电能变换	Z K
电炉变压器 附串联电抗器 电阻炉变压器	电能与热能交换	H K ZU
试验变压器	高压试验用	Y
矿用变压器	矿井下配电用	K
船用变压器	船舶配电用	S
中频变压器	1000~8000赫兹交流系统用	R
大电流变压器	大电流试验用	D

变压器的用途十分广泛，品种、规格繁多。通常，变压器的安装总容量约为发电机安装总容量的6~8倍。互感器、调压器和电抗器由于其基本原理和结构与变压器有相似之处，常和变压器一起统称为变压器类产品。这类产品在电力系统中应用概况见图25·1-1。

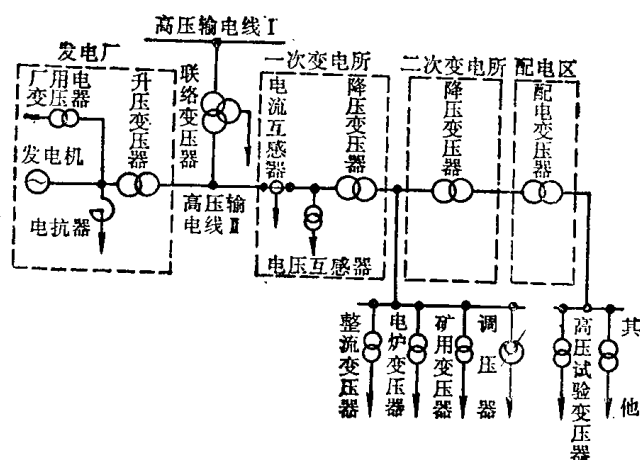


图25·1-1 变压器类产品应用示意图

随着国民经济的发展,电力系统中发电机容量与输电电压不断提高,要求发展更大容量、更高电压的电力变压器。同时,为了加强电网联网和集中控制,适应负载变化与改善供电质量的需要,还要求积极发展有载调压和自动调压装置。图 25·1-2 为

330 千伏 360 兆伏安有载调压电力自耦变压器外形图。特种变压器除要求发展更多的品种、系列外,还应注意发展组合成套装备,以适应工农业和某些特殊场所的不同需要。

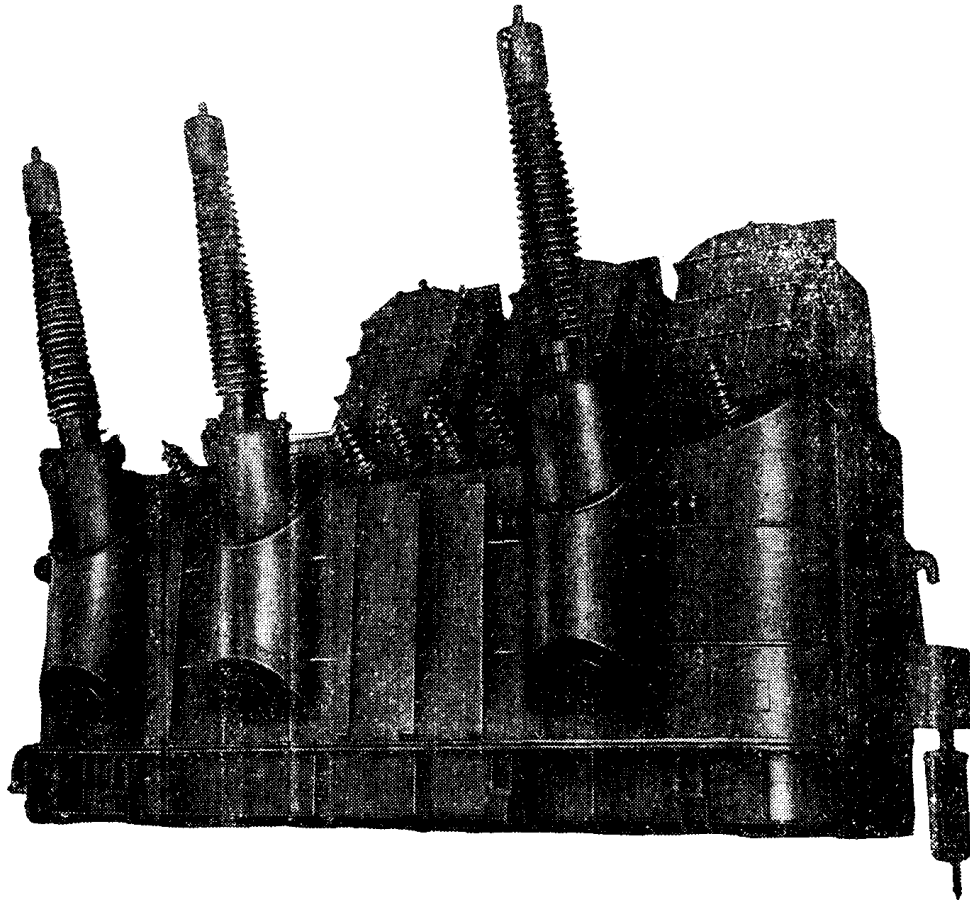


图25·1-2 330千伏360兆伏安有载调压电力自耦变压器外形图
(强迫油循环水冷却, 高压侧用电缆出线)

1·2 结构概况

目前,油浸式变压器是生产量最大、应用面最广的一类变压器。图25·1-3和表25·1-3为油浸式电力变压器结构的一般概况。

变压器结构对提高效率、节约材料、提高劳动生产率、降低成本、缩小运输尺寸和重量以及提高运行可靠性等有直接影响。

变压器的某些结构零部件要承受相当大的机械负载、热负载和高电压的作用,尤其是变压器的线圈和绝缘,必须具有足够的机械强度、绝缘强度和耐热能力,能经受住一定的过电压、过电流和短路电磁力的冲击。

改进变压器结构,不仅取决于结构设计工作的发展,而且有赖于新材料、新工艺、新技术和新装备以及标准化、系列化、通用化工作的发展和协同配合。例如,为了扩大铝线和铝合金线的应用,不断提高变压器的技术经济性能,除了应持续地开展结构设计研究以及注意电子计算技术在变压器计算和科研上应用外,同时应积极研究提高冷轧硅钢片与铝和铝合金线的性能。中小型变压器的生产,要进一步提高效率,减轻劳动强度,应注意推广和发展有利于实现机械化、自动化生产的某些铁心和线圈的新结构以及相应的生产线与新工艺。大型和特大型变压器则要积极开展电场、漏磁场、热场以及短路电磁力的模拟和测试研究,以便掌握改进结构

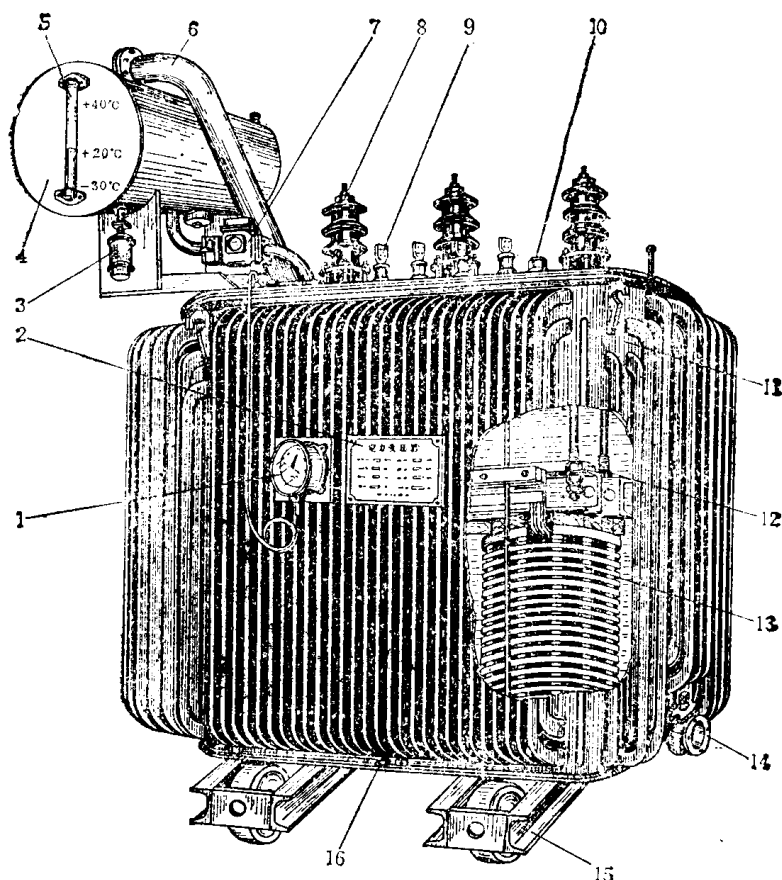


图25-1-3 油浸式电力变压器

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

表25-1-3 变压器的结构概况表

变 压 器	器 身	—铁 心
		—线 圈
		—绝 缘
		—引线及分接开关等
	油 箱	—油箱本体（包括箱盖、箱壁、箱底等）
		—附件（包括放油阀门、活门、小车、油样活门、接地螺栓、铭牌等）
	—冷却装置	—散热器或冷却器
	—保护装置	—储油柜、油表、安全气道、吸湿器、测温元件、净油器、气体继电器等
	—出线装置	—高压套管、低压套管

的有关规律。

1.3 主要技术参数

变压器在规定的使用环境和运行条件下，其主要技术参数包括：额定容量、额定电压及其分接、额定频率、线圈联接组标号以及额定性能数据（阻抗电压、空载电流、空载损耗和短路损耗）等，这

些技术参数一般都标注在变压器铭牌上。它们的定义与数据在本篇有关章节中有所规定和说明。

1.3.1 额定容量等级

按GB 1094-71规定，我国现在采用的额定容量等级基本上是按 $\sqrt[10]{10}$ 的倍数增加的，即所谓 R_{10} 容量系列，具体容量等级为：10，20，30，40，50，

63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000, 25000, 31500, 40000, 50000, 63000, 80000, 100000, 120000, 150000, 180000, 200000, 250000, 300000, 360000, 400000 千伏安等 (1967 年以前曾采用过 R₀ 容量系列)。通常, 容量为 630 千伏安及以下的变压器统称为小型变压器, 800~6300 千伏安的变压器统称为中型变压器, 8000~63000 千伏安的变压器统称为大型变压器, 90000 千伏安及以上的变压器统称为特大型变压器。

1.3.2 额定电压组合和联接组标号

不同容量等级的油浸式电力变压器的电压组合和联接组标号见表 25·1-4。

表 25·1-4 油浸式电力变压器的电压组合和联接组标号表

类别	容量 kVA	电压组合 kV			联接组标号
		高压	中压	低压	
1	10~1600	6, 10		0.4	Y/Y ₀ -12
2	630~6300	6, 10		3.15, 6.3	Y/Δ-11
3	50~1600	35		0.4	Y/Y ₀ -12
4	800~31500	35 (38.5)		3.15~10.5 (3.3~11)	Y/Δ-11 (Y ₀ /Δ-11)
5	6300 ~120000	110 (121)		6.3, 11 (10.5, 13.8)	Y ₀ /Δ-11
6	6300 ~63000	110 (121)	38.5	6.3, 11	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11
7	31500 ~120000	220 (242)		6.3~13.8 (38.5)	Y ₀ /Δ-11 (Y ₀ /Y ₀ -12)
8	31500 ~63000	220 (242)	121	6.3, 11 (38.5)	Y ₀ /Y ₀ /Δ-12-11 (Y ₀ /Y ₀ /Y ₀ -12-12)
9	63000 ~120000	220 (242)	121	10.5, 13.8 (38.5)	0-Y ₀ /Δ-12-11 (0-Y ₀ /Y ₀ -12-12)
10	120000 以上	110 以上			按技术协议

1.4 变压器容量与重量的关系

10 千伏及 35 千伏标准系列铝线圈电力变压器容量与重量的关系近似曲线见图 25·1-4; 110 千伏标准系列铝线圈 (双线圈、三线圈) 电力变压器容量与重量的关系近似曲线见图 25·1-5。

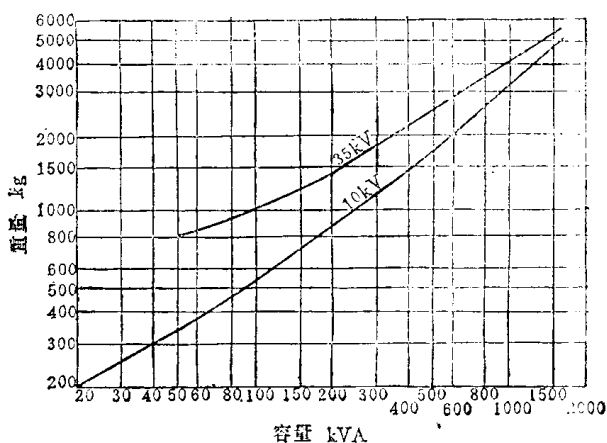


图 25·1-4 10 千伏及 35 千伏电力变压器容量与重量的关系近似曲线

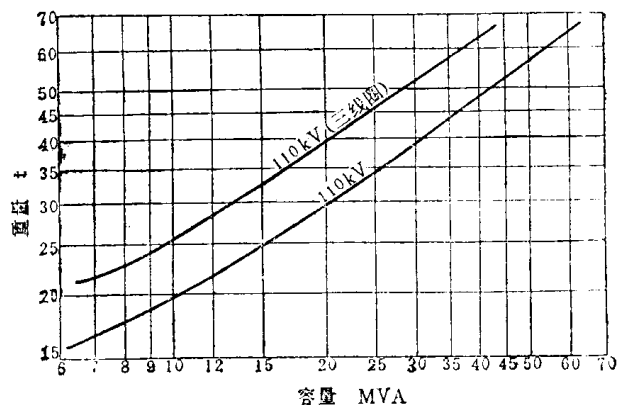


图 25·1-5 110 千伏电力变压器容量与重量的关系近似曲线

2 变压器原理

2.1 基本工作原理

为了便于了解变压器的主要作用——改变电压及电流, 先忽略变压器中的次要因素, 即假设变压器线圈的电阻、漏磁通和铁损都很小, 可略去不计; 铁心的磁导率很大, 激磁磁势也可忽略不计。图 25·1-6 为一台单相变压器 (或三相变压器的一相) 的原理图, 图中箭头符号表示各有关量的正方向 (以下均同)。

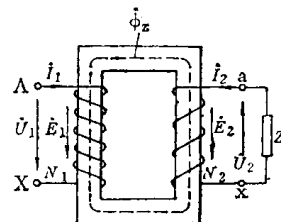


图 25·1-6 变压器基本工作原理图

2.1.1 电压比

当变压器一次侧接到频率为 f 和电压为 U_1 的正弦交流电源, 二次侧开路时, 铁心中将产生主磁通 ϕ_z 。根据电磁感应定律和电势平衡规律, 可推导出:

$$U_1 = E_1 = 4.44fN_1\phi_{z\max} \quad (25.1-1)$$

$$U_2 = E_2 = 4.44fN_2\phi_{z\max} \quad (25.1-2)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_{12} \quad (25.1-3)$$

K_{12} 为变压器的电压比。上列公式说明, 适当选择一、二次线圈匝数比 $\frac{N_1}{N_2}$, 就可以把一次侧电压改变到所需要的二次侧电压。

2.1.2 电流比

当二次侧接上负载阻抗 Z , 二次线圈中就有电流 I_2 , 一次侧线圈也同时有 I_1 输入, 以平衡二次线圈的磁势, 由此得出:

$$I_1N_1 = I_2N_2 \quad (25.1-4)$$

$$\text{或} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K_{12}} \quad (25.1-5)$$

2.1.3 容量

从公式 (25.1-3) 和公式 (25.1-5) 可以得出:

$$S = U_1I_1 = U_2I_2 \quad (25.1-6)$$

当一、二次侧的电压和电流为额定值时, 变压器容量 S 为额定容量, 以 S_n 代表。

2.1.4 阻抗折算关系

二次侧负载阻抗

$$Z = \frac{E_2}{I_2}$$

折算到一次侧时

$$Z' = \frac{E_1}{I_1} = K_{12}^2 Z \quad (25.1-7)$$

实际上, 变压器铁心磁导率不是无限大; 产生磁通需要激磁磁势, 即 $I_0N_1 = I_1N_1 - I_2N_2$, 且产生损耗; 线圈有电阻和漏磁通。在分析变压器的工作状况时必须考虑这些因素的影响。

2.2 变压器的空载运行

当变压器一次侧接到额定电压和额定频率的正

弦交流电源, 二次侧开路时, 一次线圈内有空载电流 I_0 , 产生磁势 I_0N_1 , 从而产生主磁通 ϕ_z 与一次线圈的漏磁通 ϕ_{110} (ϕ_{110} 约占全部磁通的 0.1~0.2%, 一般可忽略不计)。空载运行原理图见图 25.1-7。

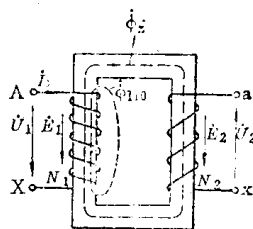


图25.1-7 单相变压器空载运行原理图

2.2.1 空载电流和空载损耗

空载电流包括有功分量 I_{0a} 和无功分量 I_{0r} 。前者又称损耗电流, 用以供给空载损耗 P_0 (空载电流在一次线圈中产生的损耗略去不计); 后者又称磁化电流, 用以激磁。上述各量的相位关系见图 25.1-9。

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad (25.1-8)$$

$$P_0 = U_1I_0\cos\varphi_0 \approx E_1I_{0a} \quad (25.1-9)$$

通常 I_0 以额定电流 I_{1n} 的百分数表示, 即 $\frac{I_0}{I_{1n}} \times 100$ 。采用冷轧硅钢片时, 中小型变压器的空载电流一般为 2~8%, 大型变压器则往往小于 1%。

当铁心没有饱和, 磁通按正弦变化时, i_{er} 接近于正弦波。但铁心趋于饱和时, i_{er} 为一尖顶波, 见图 25.1-8。此尖顶波除含基波 i_{01} 外, 还有一较强的三次谐波 i_{03} 和其它高次谐波。磁化电流的三次谐波分量对某些三相变压器的运行会引起不利的影响 (参见本章 4.2)。

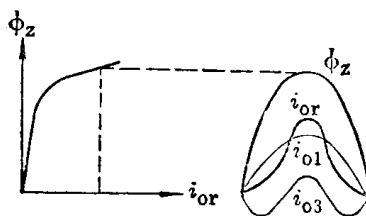


图25.1-8 磁化电流波形

2.2.2 矢量图和等值电路

图 25.1-9、图 25.1-10 分别为空载运行矢量图和等值电路。由于 I_0 以及一次线圈的电阻 r_1 和 ϕ_{110} 均较小, 一次线圈的电阻电压 I_0r_1 和电抗电压 I_0x_1 可忽略不计, 即 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$, $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$

$$\text{则} \quad \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_{12} \quad (25.1-10)$$

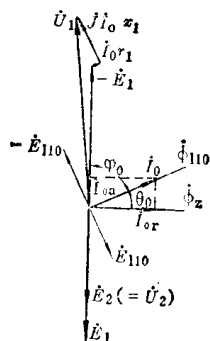


图25-1-9 单相变压器空载运行矢量图

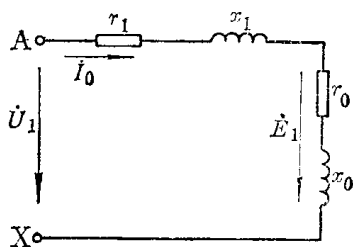


图25-1-10 单相变压器空载运行等值电路

变压器空载运行时，近似于一个带铁心的电感线圈。由图 25-1-10 可见

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 [(r_1 + jx_1) + (r_0 + jx_0)] = \dot{I}_0 (z_1 + z_0) \quad (25-1-11)$$

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 (r_0 + jx_0) = \dot{I}_0 z_0 \quad (25-1-12)$$

式中 r_0 、 x_0 、 z_0 分别代表激磁电路的等值电阻、等值电抗和等值阻抗，均不是常数。但在变压器实际运行中，当 U_1 变动不大时，可不考虑 z_0 的变化。在数值上 z_0 比 z_1 要大得多，这是由于在额定电压下的空载损耗比空载时的线圈电阻损耗大得多，而主磁通比漏磁通大得多。

2.2.3 空载合闸

变压器空载合闸接到电源的瞬间，由于铁心的饱和与剩磁的影响，瞬时电流往往比稳态运行时的空载电流大，甚至可达额定电流的数倍。

空载合闸过程主要表现为磁通变化的过渡过程。瞬时主磁通的大小，决定于合闸时电压的瞬时值和铁心中的剩磁。合闸时电压瞬时值为零，情况最为严重，瞬时主磁通在第一个半波内就达到将近稳态磁通最大值 ϕ_{zmax} 的两倍，如图 25-1-11 所示。此时若铁心剩磁 ϕ_s 与第一个半波的磁通方向一致，则瞬时主磁通将增加为 $(2\phi_{zmax} + \phi_s)$ 。由于铁心

的饱和，瞬时电流就很大，其中含有较强的高次谐波。这个电流将在几个周波内衰减而达稳定，因而对变压器没有直接危险，但能引起一次侧过电流保护装置动作，使变压器从电源断开。遇到这种情况，可重合闸几次，当瞬时主磁通较小时，就可不跳闸。

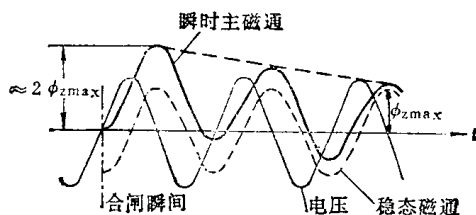


图25-1-11 合闸瞬间电压为零值的瞬时主磁通 (不包括铁心剩磁)

2.3 变压器的负载运行

在空载运行的基础上，当二次侧接上负载阻抗 Z 时，变压器将有电流 I_2 输出，同时输入电流也从 I_0 相应增加到 I_1 。由于变压器内电流的影响，将使二次侧电压 U_2 有所改变，其变化大小取决于负载的大小和性质以及变压器本身的阻抗。

2.3.1 负载运行时的基本方程式

图25-1-12为负载运行原理图， ϕ_{11} 、 ϕ_{12} 分别代表一、二次线圈漏磁通。按照磁路的全电流定律，两线圈的磁势平衡方程式为

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_0 N_1 \quad (25-1-13)$$

$$\text{故 } I_1 = I_0 + I_{1z} = I_0 + \left(-\frac{I_2}{K_{12}} \right) \quad (25-1-14)$$

式中 I_{1z} 为 I_1 的负载分量，用以抵消 I_2 所产生的磁势。

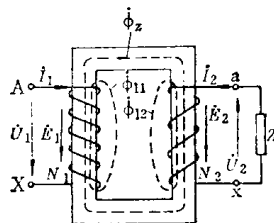


图25-1-12 单相变压器负载运行原理图

根据电势平衡规律，可推导出一、二次电压的基本方程式：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 \quad (25-1-15)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(r_2 + jx_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2 \quad (25.1-16)$$

式中 r_1 、 r_2 、 x_1 、 x_2 分别代表一、二次线圈的电阻和漏电抗。

2.3.2 矢量图和等值电路

图 25.1-13、图 25.1-14 分别为负载运行矢量图和等值电路。由于 $I_1 z_1$ 一般只有 U_1 的 2~5%，可认为 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 。因此，负载运行时 ϕ_2 和 I_0 与空载运行时相差不多。当 I_0 很小时， I_1 和 I_2 仍近似地与 N_1 和 N_2 成反比。负载运行时，变压器自电源汲取的功率为

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (25.1-17)$$

二次侧输出功率为

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 - E_1 I_0 - I_1^2 r_1 - I_2^2 r_2 \quad (25.1-18)$$

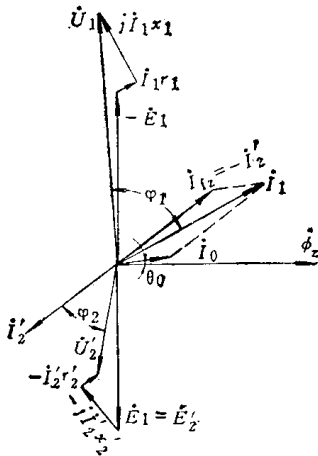


图25.1-13 单相变压器负载(感性)运行矢量图

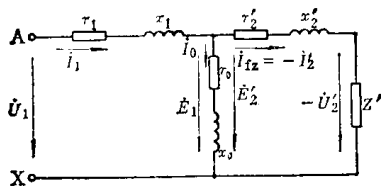


图25.1-14 单相变压器负载运行等值电路

2.3.3 阻抗电压和短路损耗

由于变压器的空载电流很小，它对 z_1 的压降可忽略不计。因此，图 25.1-14 等值电路可简化为图 25.1-15，图中 $r_{12} = r_1 + r_2$ ， $x_{12} = x_1 + x_2$ 。

当二次线圈端子短接(稳态短路)，即 $Z' = 0$ ，则 $U_2' = 0$ 。此时，为使一次线圈产生额定电流 I_{1n} 而施加的电压，称为阻抗电压 U_z ；变压器自电源汲取的功率，即为短路损耗 P_s 。(计算公式参见本章 3.5.1)

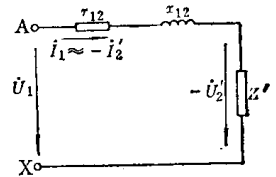


图25.1-15 忽略空载电流的等值电路

$$U_z = I_{1n}(r_{12} + jx_{12}) = I_{1n}z_{12} \quad (25.1-19)$$

通常阻抗电压以额定电压的百分数表示，即

$$u_z = \frac{U_z}{U_{1n}} \times 100 \quad (25.1-20)$$

当施加的电压为额定一次电压 U_{1n} 时，稳态短路电流

$$I_{1s} = \frac{U_{1n}}{z_{12}} = \frac{I_{1n}}{u_z} \times 100 \quad (25.1-21)$$

阻抗电压是变压器的一个重要参数，它与变压器的成本和动、热稳定等有关，还对电力系统的稳定、供电质量以及继电保护等有影响。为了降低运行中的电能损失和电压波动，阻抗电压应小些；从减小短路电流考虑，阻抗电压应大些。但阻抗电压过大或过小，都会导致制造成本增加。标准系列电力变压器的阻抗电压百分数在 JB1300~1304-73 中都有一定规定。阻抗电压百分数的两个分量与容量有关：电阻电压百分数 u_r 随容量的增加而减小，而电抗电压百分数 u_x 则增大。 $\frac{u_x}{u_r}$ 的比值，一般大型变压器可达 10~15，中小型变压器则在 1~5 的范围内。

2.3.4 突发短路

当忽略空载电流时，变压器相当于一个阻抗 $z_{12} = r_{12} + jx_{12}$ 。稳态短路电流 I_{1s} 一般为额定电流的几倍到二十几倍。二次侧突发短路时，若不考虑系统阻抗，则

$$i_{1s} = \sqrt{2} I_{1s} \left[\cos \varphi_0 e^{-\frac{r_{12}}{x_{12}} \omega t} - \cos(\omega t + \varphi_0) \right]$$

短路电流 i_{1s} 变化的过渡过程取决于二次侧突发短路时一次电压 u_1 的初相角 φ_0 。当 $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ 时， $i_{1s} = \sqrt{2} I_{1s} \sin \omega t$ 。这种情况与稳态短路相同，没有过渡过程。当 $\varphi_0 = 0$ 时，即电压 u_1 过零时发生短路，

$$i_{1s} = \sqrt{2} I_{1s} \left(e^{-\frac{r_{12}}{x_{12}} \omega t} - \cos \omega t \right), \text{ 如图 25.1-16 所}$$

示,情况最为严重。当 $\omega t = \pi$ 时,短路电流的不对称峰值为

$$i_{1sm} = \sqrt{2} I_{1s} (1 + e^{-\frac{\pi r_{12}}{x_{12}}}) = \sqrt{2} K_s I_{1s} \quad (25\cdot1-22)$$

式中 $K_s = 1 + e^{-\frac{\pi r_{12}}{x_{12}}}$

中小型变压器的 $K_s = 1.2 \sim 1.4$

大型变压器的 $K_s = 1.7 \sim 1.8$

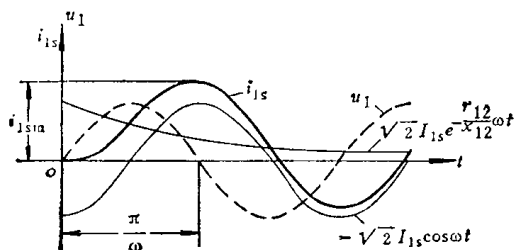


图25-1-16 突发短路时的电流曲线

变压器应能承受 i_{1sm} 产生的电磁力和热作用而无形损伤,即保证变压器的动、热稳定。

2.4 变压器运行性能

2.4.1 电压变动率

变压器负载运行时,由于有阻抗电压,二次电压将随着负载电流和负载功率因数的改变而改变。

变压器的电压变动率

$$\varepsilon\% = \frac{U_{2n} - U_2}{U_{2n}} \times 100$$

式中 U_{2n} ——额定二次电压;

U_2 ——负载时的二次电压。

当已知变压器的电阻电压百分数 u_r 及电抗电压百分数 u_x 时,可按不同的负载系数 K_{fz} 和负载功率因数 $\cos\varphi_2$,用下式计算电压变动率:

$$\varepsilon\% = K_{fz} (u_r \cos\varphi_2 + u_x \sin\varphi_2) + \frac{K_{fz}^2 (u_x \cos\varphi_2 - u_r \sin\varphi_2)^2}{200} \quad (25\cdot1-23)$$

如不需要特别准确时,则可按下式计算

$$\varepsilon\% = K_{fz} (u_r \cos\varphi_2 + u_x \sin\varphi_2) \quad (25\cdot1-24)$$

式中 $K_{fz} = \frac{\text{输出容量}}{\text{额定容量}}$;

$\sin\varphi_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2\varphi_2}$, 滞后电流取正值,超前电流取负值。

电压变动率是衡量变压器供电质量好坏的指标之一。当变压器的阻抗电压百分数一定时,电压变动率主要与负载功率因数有关。当 $\cos\varphi_2 = 1$ 时, ε 为最小; $\cos\varphi_2$ 较小时, ε 主要取决于 u_x , 大型变压器的 u_x 较大, ε 就较大。

2.4.2 效率

变压器的效率为输出的有功功率 P_2 与输入有功功率 P_1 之比,以百分数表示

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100$$

负载运行时, P_2 与负载系数 K_{fz} 和负载功率因数 $\cos\varphi_2$ 有关。若略去变压器中阻抗电压的影响,则效率为

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + K_{fz}^2 P_s}{K_{fz} S_n \cos\varphi_2 + P_0 + K_{fz}^2 P_s} \right) \times 100 \quad (25\cdot1-25)$$

通常,中小型变压器 η 约在 95~98% 的范围内,大型变压器一般在 99% 以上。

2.5 三线圈变压器

三线圈变压器大多用于二次侧需要两种不同电压的场合。图25-1-17表示三线圈变压器结构的示意图。

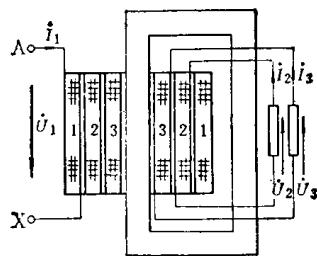


图25-1-17 单相三线圈变压器结构示意图

2.5.1 电压比

三线圈变压器的空载运行原理与双线圈变压器基本相同,但有三个电压比

$$\left. \begin{aligned} K_{12} &= \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \\ K_{13} &= \frac{N_1}{N_3} = \frac{E_1}{E_3} \approx \frac{U_1}{U_3} \\ K_{23} &= \frac{N_2}{N_3} = \frac{E_2}{E_3} \approx \frac{U_2}{U_3} \end{aligned} \right\} \quad (25\cdot1-26)$$

2.5.2 电流和电压关系

三线圈变压器负载运行时的磁势平衡方程式为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 + \dot{I}_3 N_3 = \dot{I}_0 N_1 \quad (25.1-27)$$

如忽略空载电流 I_0 ，并将两个二次线圈的 量折算到一次线圈，则

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = 0$$

一次线圈 1 和两个二次线圈 2 及 3 间的阻抗电压为

$$\dot{U}_1 + \dot{U}'_2 = \dot{I}_1 (r_1 + jx_{1d}) - \dot{I}'_2 (r'_2 + jx'_{2d}) \quad (25.1-28)$$

$$\dot{U}_1 + \dot{U}'_3 = \dot{I}_1 (r_1 + jx_{1d}) - \dot{I}'_3 (r'_3 + jx'_{3d}) \quad (25.1-29)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{I}_1 (r_1 + jx_{1d}) &= -\dot{U}'_2 - \dot{I}'_2 (r'_2 + jx'_{2d}) \\ &= -\dot{U}'_3 - \dot{I}'_3 (r'_3 + jx'_{3d}) \end{aligned} \quad (25.1-30)$$

式中 x_{1d} 、 x'_{2d} 、 x'_{3d} 分别为各线圈的自感电抗和线圈间的互感电抗所合成的等值电抗，它们与双线圈变压器各线圈的漏电抗不同。

三线圈变压器各线圈的容量是按需要分别规定的，其额定容量是指容量最大的一个线圈的容量。

2.5.3 等值电路

图25.1-18为三支等值电路，图中 Z'_2 和 Z'_3 为负载阻抗。由图可见两个二次线圈负载电流的相互影响。当 I_3 变化时，不仅影响电压 U_3 ，而且电压 U_2 也随着变化。

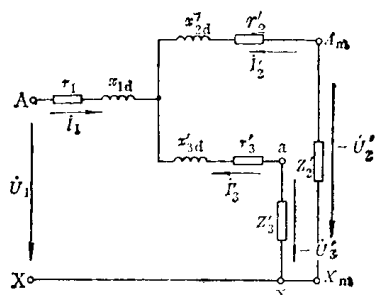


图25.1-18 单相三线圈变压器的三支等值电路

等值电路中各参数可按下列公式计算

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{r_{12} + r_{13} - r'_{23}}{2} \\ r'_2 &= \frac{r_{12} + r'_{23} - r_{13}}{2} \\ r'_3 &= \frac{r_{13} + r'_{23} - r_{12}}{2} \\ x_{1d} &= \frac{x_{12} + x_{13} - x'_{23}}{2} \\ x'_{2d} &= \frac{x_{12} + x'_{23} - x_{13}}{2} \\ x'_{3d} &= \frac{x_{13} + x'_{23} - x_{12}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (25.1-31)$$

以上带撇的各量均为折算到一次线圈的量。

2.6 自耦变压器

自耦变压器的结构特点是一、二次线圈在电路上相连，并有一部分线圈是公共的。

降压自耦变压器的结构原理见图25.1-19。

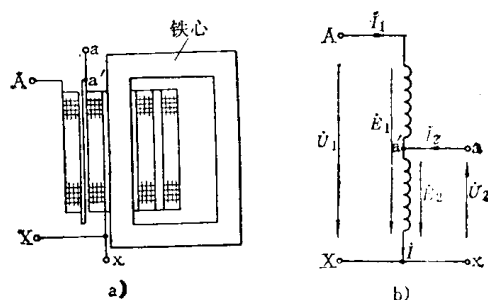


图25.1-19 单相降压自耦变压器结构原理图

a—结构示意图 b—接线原理图

A—X：一次线圈，匝数 N_1 a—x：二次线圈（公共线圈），匝数 N_2 A—a：串联线圈

自耦变压器的电压比，当忽略阻抗电压时，与普通变压器一样，即

$$K_{12} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad (25.1-32)$$

其磁势平衡方程式为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (25.1-33)$$

当忽略空载电流时

$$\dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{K_{12}} = 0 \quad (25.1-34)$$

从图25.1-19 b 中 a' 点得出：

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_2 \left(1 - \frac{1}{K_{12}} \right) \quad (25.1-35)$$

自耦变压器的通过容量为由电源侧传递到负载侧的容量。它可分为电磁容量和传导容量两部分，

前者系由串联线圈与公共线圈间的电磁感应传递,后者则通过电路A-a'-a直接传递到负载。

通过容量 $=U_1 I_1 = U_2 I_2$,当一、二次电压和电流为额定值时,即为自耦变压器额定容量。此时,串联线圈和公共线圈的容量均为额定容量的 $\left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right)$ 倍。 $\left(1 - \frac{1}{K_{12}}\right) = K_{xy}$ 称为效益系数。 K_{xy} 总是小于1。由此可见,自耦变压器与双线圈变压器不同,前者线圈容量小于额定容量。所以当两者额定容量相同时,自耦变压器的损耗小、重量轻、成本低。同理,自耦变压器的阻抗电压较小,而短路电流较大,在结构设计以及在使用中要采取相应的措施。此外,由于一、二次线圈在电路上相连,为了过电压保护,自耦变压器的中性点必须直接接地,在安装后即使在未投入运行的情况下,其一、二次侧均应装设避雷器。

3 变压器的结构和设计

3.1 设计的一般程序

变压器电磁计算的任务在于确定变压器的电、磁负载和主要几何尺寸,计算性能数据和各部分的温升以及计算变压器的重量和外形尺寸。计算的结果必须满足有关技术标准的规定和使用部门的要求。变压器结构设计任务在于选定结构型式,绘制全部零部件图。结构设计应特别注意保证线圈的绝缘强度,动、热稳定,保证铁心、油箱等的机械强度,使变压器能安全运行;同时应使整体结构及其零部件的制造符合节省材料和工时以及便于运输、安装和维护等要求。结构与电磁计算是交错进行的,例如,变压器的电、磁负载数据是根据铁心和线圈的结构型式确定的;各部分的温升计算则是根据油箱和冷却装置的结构设计来选取相应数据的。

变压器设计工作应本着多快好省的原则,根据国家的经济、技术政策和资源情况以及运行和制造方面的要求,合理地制定变压器的性能数据和相应的结构。由于运行和制造所考虑的角度不同,对某些性能数据的要求也往往有所不同。例如,从运行的经济性考虑,要求变压器的效率高、损耗低,但在给定的条件下,降低损耗必然导致材料消耗和制造成本增加。所以设计变压器时必须立足全局,对各方面因素进行综合考虑,并应进行多方案比较,选取最佳方案。此外,为了适应变压器多品种、

多规格的特点,还应使同一规格变压器的多种电压组合共用同一种铁心结构,使不同规格的变压器尽可能采用相同的零部件和安装要求。

设计的一般程序见图25·1-20。在现有产品的基础上改变部分技术参数的设计,可以只进行图25·1-20中相应部分的设计工作。

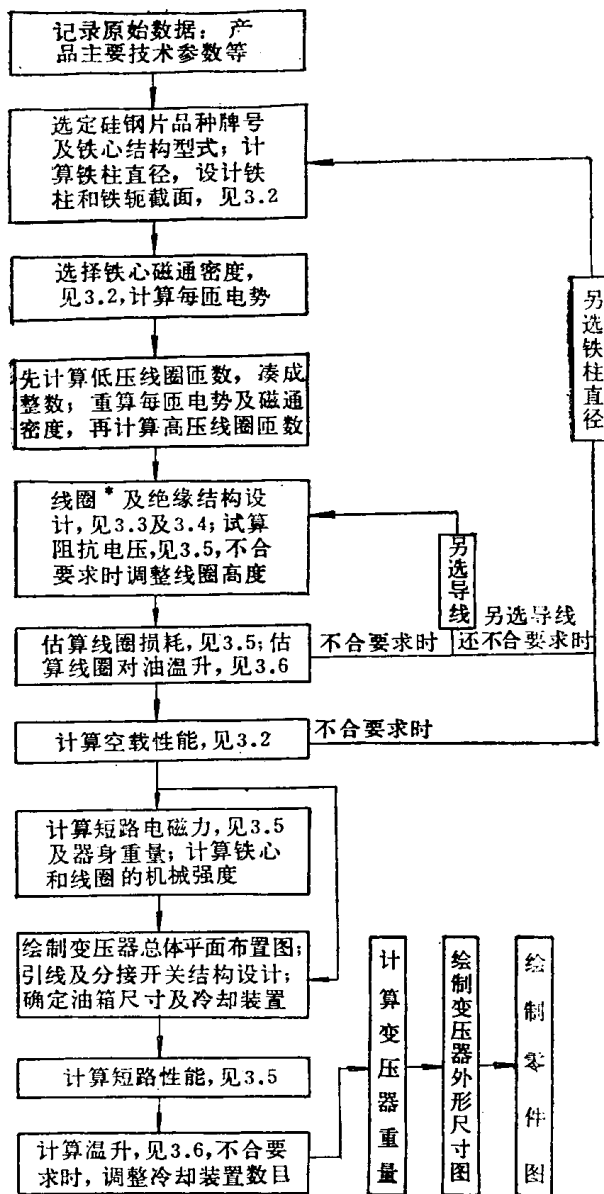


图25·1-20 设计的一般程序图

* 若无生产实践数据,初选线圈高度等于铁柱直径的 n 倍。铝线圈 $n=2.7\sim3.6$;铜线圈 $n=1.8\sim2.4$

3.2 铁心

铁心是变压器的磁回路,也是器身的骨架。它由铁柱、铁轭和夹紧装置组成。套装线圈的部分叫铁

柱，联接各铁柱形成闭合磁回路的部分叫铁轭或旁轭。夹紧装置用来夹持铁柱和铁轭以构成坚实的整体，借以支撑和卡紧线圈、固定引线和分接开关。

3.2.1 铁心的结构型式

变压器铁心一般有心式和壳式两类，我国变压器大多采用心式铁心。图 25·1-21 为三相三柱式铁心的典型结构。

常用的心式铁心见图 25·1-22，其结构特征和适用范围见表25·1-5。

图25·1-21 三相三柱式铁心（中小型变压器）
1—下夹件 2—铁心磁回路 3—铁柱绑扎 4—拉螺杆 5—铁轭螺杆 6—上夹件 7—接地片

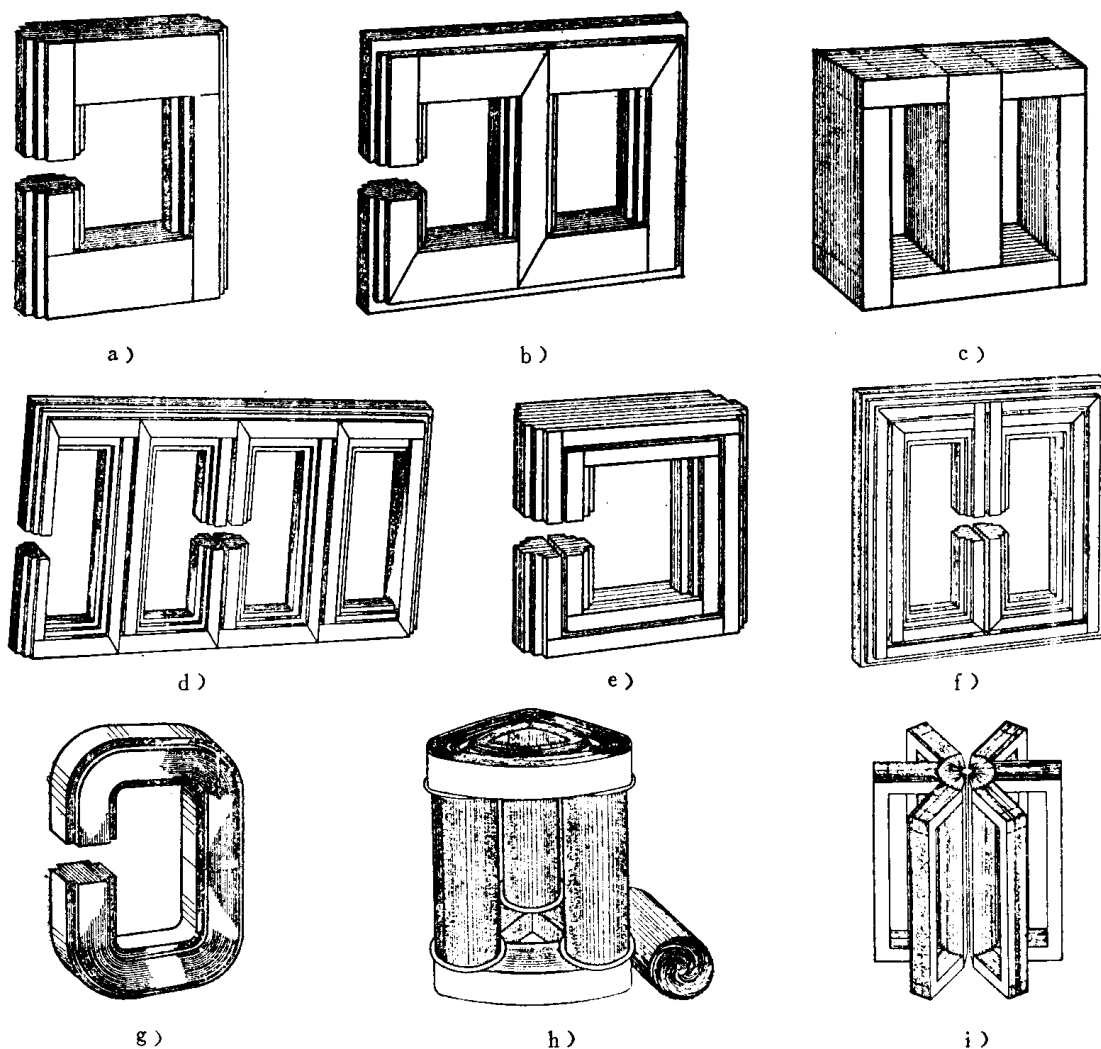
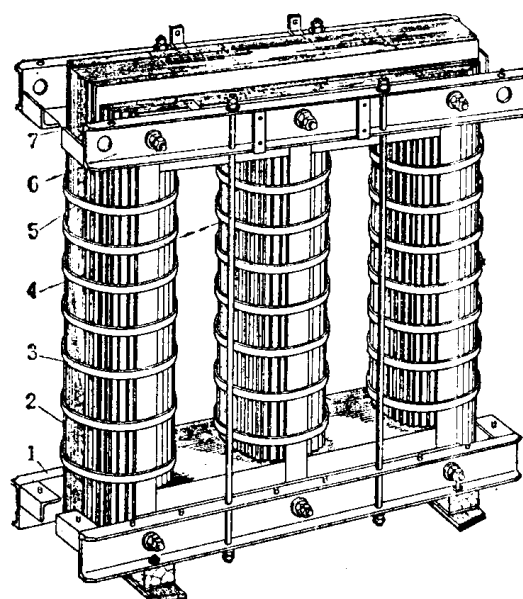


图25·1-22 常用的心式铁心
a—单相双柱式 b—三相三柱式 c—单相单柱旁轭式 d—三相三柱旁轭式（又称三相五柱式）
e—单相双框式 f—三相双框式 g—单相卷铁心 h—三相渐开线型铁心 i—单相辐射式铁心

表25·1-5 常用心式铁心的结构特征和适用范围

型 式	图 号	结 构 特 征	适 用 范 围
单相双柱式铁心	25·1-22 a	铁柱与铁轭在同一垂直平面内，以叠接方式连接，结构简单，工艺装备少，但叠装工作量大	是应用最广泛的典型结构，适用于各类变压器
三相三柱式铁心	25·1-22 b		
单相单柱旁轭式铁心	25·1-22 c	是上述型式的派生结构。可使铁心总高度降低，便于运输，并有助于减少结构损耗，但单相的硅钢片用量有所增加。单相的旁轭截面为铁柱截面的1/2。三相的铁轭和旁轭，如磁通按正弦波形考虑时，其截面分别为铁柱截面的 $1/\sqrt{3}$	单相的适用于低电压大电流变压器、高压试验变压器等。三相的适用于特大型变压器、电压互感器等
三相三柱旁轭式铁心	25·1-22 d		
单相双框式铁心	25·1-22 e	是另一类派生结构。单相的是由截面相等的内外两框构成。三相的由截面相等的一个外框和两个内框构成，在中间铁柱两端内外框有半数叠片连在一起。框间有冷却油道。这类结构冷却效果好，并可改善空载性能	铁柱直径较大、叠片宽度超过硅钢片宽度的特大型变压器
三相双框式铁心	25·1-22 f		
单相卷铁心	环形或矩形整体式	用带料连续卷成，不需叠装，空载性能好。但线圈绕制须有专用设备	小型变压器、互感器、接触调压器等
	C形对接式	25·1-22 g 用上述矩形整体卷铁心锯成两半，套装线圈后用树脂胶合。因有对接的缝隙，空载电流比整体卷铁心大	小型变压器、互感器等
三相渐开线型铁心	25·1-22 h	铁柱叠片用成形机压成渐开线型，叠装方便；铁轭用带料卷成，生产机械化程度高。铁轭截面为铁柱截面的 $1/\sqrt{3}$ ，铁柱外径与其内孔直径之比为4.5~6，这种结构三相磁路对称，可节约硅钢片用量，但空载电流和噪音较大	成批生产的中小型变压器
单相辐射式铁心	25·1-22 i	铁柱叠片排列成辐射状，旁轭沿铁柱圆周径向对装，这种结构可降低铁心总高度，减少结构损耗，但制造费工，空载性能较差	特大型变压器和高压并联电抗器

小些。

3.2.2 铁柱直径和磁通密度的选择

a 铁柱直径 D_z 是影响变压器性能和制造成本的主要尺寸之一。 D_z 选得大，铁心硅钢片重量、空载损耗和空载电流将相应增大；而线圈导线重量、短路损耗和阻抗电压则相应减小。为满足一定的损耗和阻抗电压的要求，通常 D_z 可按下式计算

$$D_z = K_D \sqrt[4]{S_z} \text{ mm} \quad (25\cdot1-36)$$

式中 S_z ——变压器每柱容量；

K_D ——经验系数。

不同类型变压器的 S_z 与额定容量 S_n 的关系以及相应的 K_D 见表 25·1-6。

从表 25·1-6 可见：同类型同容量的变压器，在保证同样性能的情况下，用冷轧硅钢片和铝线圈时，其铁柱直径比用热轧硅钢片和铜线圈时，可选得

表25·1-6 经验系数 K_D 。

变 压 器 类 别	每柱容量 S_z kVA	K_D (适用于 50Hz)	
		冷轧片	热轧片
三相双线圈	$S_n/3$		
三相三线圈	$S_n/2$	铝线圈	铝线圈
单相双线圈①	$S_n/2$	50~56	54~60
单相三线圈①	$3S_n/4$	铜线圈	铜线圈
三相自耦② $K_{xy}=0.5$ 时	$S_n/4$	54~60	58~64
单相自耦①② $K_{xy}=0.5$ 时	$3S_n/8$		

- ① 铁心为单相双柱式结构。
② 有第三线圈，其容量与自耦变压器额定容量之比为 K_{xy} 。

按公式 (25·1-36) 算出的 D_z 应凑成整数，并

使其符合标准直径。现行的标准直径如下：

- 80~270.....每增加5毫米为一档
- 280~500.....每增加10毫米为一档
- 520~740.....每增加20毫米为一档

b 铁柱磁通密度的选择，关系到硅钢片的充分利用，也关系到变压器的性能。由于硅钢片具有饱和特性，磁通密度选得过高，将导致空载损耗和空载电流增加以及噪音和空载合闸电流过大。

铁柱磁通密度 B_z 推荐采取下列数值：

- 冷轧硅钢片 $B_z \leq 17000$ 高斯
- 热轧硅钢片 $B_z \leq 14500$ 高斯

3.2.3 铁柱和铁轭截面的设计

a 铁柱截面的设计必须从节约材料和简化工艺两方面考虑。为了充分利用线圈内圆空间，心式铁心的铁柱截面常采用多级梯形，如图 25.1-23 所示。级数愈多，截面愈接近于圆形，在一定的直径下铁柱的有效截面也愈大，线圈匝数则可相应减少。但级数增加，叠片种类随着增多，从而使铁心的制造工艺复杂化。通常铁柱截面的合理级数可参照表 25.1-7 选取。

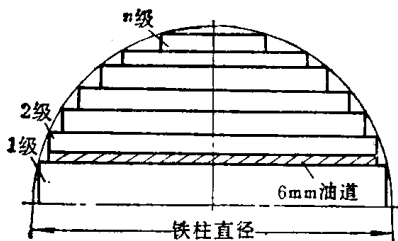


图25.1-23 铁柱截面

表25.1-7 铁柱截面级数的选择

铁柱直径 mm	级数
80~195	5~7
200~265	8~10
270~390	11
400~740	12~14
760以上	>15

b 叠片系数与硅钢片厚度、平整度和片间绝缘有关。0.35毫米冷轧硅钢片，无漆膜绝缘时，叠片系数可取0.94~0.95，有漆膜绝缘时则取0.93~0.94；0.35毫米热轧硅钢片，有漆膜绝缘时取0.91

~0.92。

铁柱多级梯形截面的几何面积（不包括油道）乘以叠片系数，即为铁柱的有效截面。

c 为了改善铁心内部的散热条件，铁柱直径为380毫米及以上时，须设置冷却油道。油道数可按表 25.1-8 选取。油道的位置应使其分割的各部分铁柱截面积近似相等。

表25.1-8 冷却油道数的选择

铁柱直径 mm	6mm 油道个数	
	冷轧片 $P15/50$ =1.1时	热轧片 $P10/50$ =1.05时
380~410	0	1
420~500	1	2
520~620	2	2
640~680	2	3
700~840	3	—

d 特大型变压器中，漏磁场在铁柱最小级叠片内产生的涡流较大。为防止引起局部过热，可采取将该级叠片开槽或增设磁分路等措施。

e 铁轭截面有矩形、T形和多级梯形几种，见图 25.1-24。

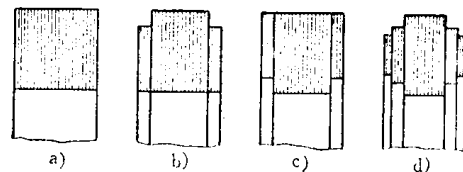


图25.1-24 铁轭截面

a—矩形 b—外T形 c—内T形 d—多级梯形

用冷轧硅钢片制造的铁心，铁轭截面与铁柱截面形状相同，磁通在铁轭中的分布较均匀，所以空载性能较好，制造方便。用热轧硅钢片制造的铁心，为了使夹件、绝缘零件等结构简化，铁轭截面一般多采用矩形或T形。此时，为了降低空载电流和空载损耗，往往使铁轭截面比铁柱截面放大5~10%。

3.2.4 铁心叠积图

选择铁心叠积图时，要充分考虑硅钢片具有方向性的特点，即顺着材料辗压方向的导磁性能最好，单位损耗最小，而垂直于辗压方向的性能就显著变坏。冷轧硅钢片的方向性比热轧硅钢片更为明显。冷轧硅钢片在上述两种不同方向的单位损耗相

差很大,后者为前者的3~4倍。为了避免磁通转向时垂直于辗压方向,冷轧硅钢片铁心接缝宜采取45°的斜接缝,见图25.1-25a。热轧硅钢片铁心可以采取直接缝,见图25.1-25b。但由于斜接缝叠片的剪切工艺装备比较复杂,有些制造厂采用图25.1-25c的半直半斜接缝;这样做,加工设备简单,材料利用率也较高。

图25.1-25所示为一层叠片的接缝位置,如将此图上下倒置,即可得到相邻层的接缝位置。叠装后相邻两层的接缝互相错开。通常每层叠两片。

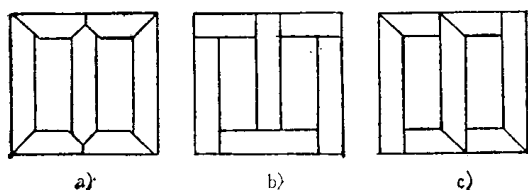


图25.1-25 三相铁心叠积图

a—斜接缝 b—直接缝 c—半直半斜接缝

3.2.5 空载性能计算

空载性能包括空载损耗和空载电流,两者与铁心结构型式、所用硅钢片质量、磁通密度和铁心重量等有关,与变压器所带负载无关。

a. 空载损耗

$$P_0 = K_{fs} (p_z G_z + p_E G_E) \quad W \quad (25.1-37)$$

式中 K_{fs} ——附加损耗系数,根据所用叠积图、材料和工艺确定,用冷轧硅钢片时,一般可在1.2~2范围内选取;

p_z, p_E ——对应于铁柱、铁轭磁通密度 B_z, B_E 的单位损耗 W/kg ;

G_z, G_E ——铁柱、铁轭的重量 kg 。

b. 空载电流

$$\left. \begin{aligned} I_0 &= \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \% \\ I_{0a} &= \frac{P_0}{10 S_n} \% \\ I_{0r} &= \frac{K_1}{10 S_n} (q_z G_z + q_E G_E + n_z q_{jz} A_z + n_E q_{jE} A_E) \% \end{aligned} \right\} \quad (25.1-38)$$

式中 K_1 ——校正系数,根据所用叠积图、材料和工艺确定;

q_z, q_E ——对应于 B_z, B_E 的单位激磁容量 VA/kg ;

q_{jz}, q_{jE} ——对应于 B_z, B_E 的接缝处单位面积激磁容量 VA/cm^2 ;

A_z, A_E ——铁柱、铁轭的有效截面 cm^2 ;

n_z, n_E ——铁柱、铁轭的接缝数,如三相三柱式铁心直接缝(图25.1-25b) $n_z = 3$, $n_E = 4$; 半直半斜接缝(图25.1-25c) $n_z = n_E = 4$ 。

3.2.6 夹紧装置

由硅钢片叠成的铁心必须予以夹紧,使之成为坚实的整体。夹紧装置的设计应满足以下要求:

a 叠片的夹紧要均匀,避免叠片边缘或接缝处翘起,以防止铁心激磁时产生不正常的声音;

b 夹件应能承受夹紧铁轭时的夹紧力,吊起整个器身时的重力,以及变压器发生短路时的电磁力;

c 要减少磁通进入夹件以降低结构损耗。为此,夹件和铁轭之间应用绝缘件隔开。大、中型变压器夹件和铁轭之间须设置油道,以改善散热;

d 在特大型变压器中,为了防止漏磁通进入夹件引起局部过热,夹件应尽可能远离强漏磁区。

铁柱用环氧玻璃粘带绑扎,绑扎后加热固化。但当直径小于220毫米,窗高又小于600毫米时,可以不绑扎,而在线圈和铁柱间插入木撑板固定。铁轭用型钢或钢板制成的夹件通过螺杆夹紧,或用钢带扎紧。

3.2.7 铁心接地

为了防止变压器在运行或试验时,由于静电感应作用在铁心或其它金属结构件上产生悬浮电位,造成对地放电,铁心及其所有金属结构件,除穿心螺杆外,都必须可靠地接地。由于铁心叠片间的绝缘电阻较小,一片叠片接地即可认为所有叠片均接地。

铁心叠片只允许有一点接地。如果有两点或两点以上接地,则接地点之间可能形成闭合回路,当主磁通穿过此闭合回路时,就会在其中产生循环电流,造成局部过热事故。

3.3 线圈

变压器线圈由导线和绝缘零件组成。绝缘零件构成线圈的主绝缘和纵绝缘,使线圈固定在一定的位置,并形成冷却油道。线圈与输配电网相连,为了保证变压器的可靠运行,它既要能在额定工作

条件下长期使用，又要能经受住过渡过程(如短路、雷击、开关操作等)中产生的过电流、过电压以及相应的电磁力的作用，不致发生绝缘击穿、过热、变形或破坏。所以，线圈是变压器的最关键的部件，它应具有足够的绝缘强度、机械强度、耐热能力及良好的散热条件，而且还要具有合理的工艺性

和经济性。

3.3.1 线圈的结构型式

变压器线圈随容量的大小和电压的高低而选定不同的结构型式。常用的几种线圈见图25·1-26，其基本特征和适用范围见表25·1-9。

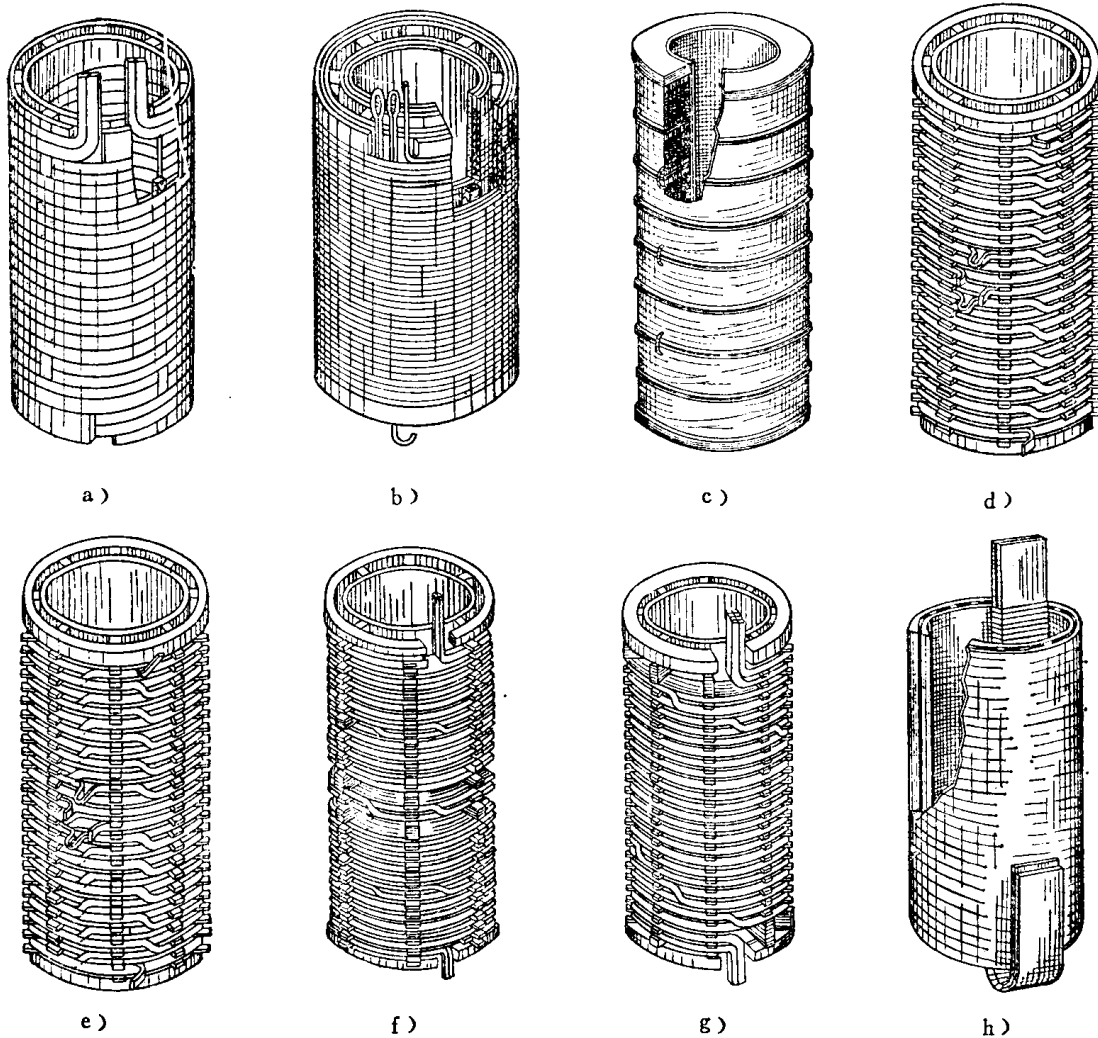


图25·1-26 常用的几种线圈

a—双层圆筒式 b—多层圆筒式 c—分段式 d—连续式 e—纠结式
f—单螺旋式 g—双螺旋式 h—铝箔筒式

表25·1-9 常用线圈的基本特征和适用范围

线圈型式	基本特征	图号	适用范围
圆筒式(分单层、双层、多层三种)	是同心式线圈的最简单型式。工艺性好，便于绕制，层间油道散热效率高，但端部支撑的稳定性较差。低压线圈用1~6根扁导线直接在绕线模上并绕而成。高压线圈用圆导线(或扁导线)在绝缘筒(或固定于绝缘筒的撑条)上绕成。35千伏高压线圈为了使起始电压分布均匀，在线圈内层放置静电屏，与线圈线端相连接。层间绝缘为电缆纸或油道。线圈两端有绝缘件填平	25·1-26 a 双层(或四层)	一般用于三相容量为630千伏安及以下、电压为1千伏及以下的低压线圈
		25·1-26 b 多层	一般用于三相容量为630千伏安及以下、电压为3~15千伏的线圈，如放置静电屏，则可用于35千伏的高压线圈

(续)

线圈型式	基本特征	图 号	适 用 范 围
分段式	相当于将多层圆筒式线圈沿轴向分成若干线段组成。线段间放置绝缘纸圈。这种线圈可降低层间绝缘所承受的工作电压,但制造比圆筒式复杂	25.1-26c	电压互感器或高压试验变压器的高压线圈
连续式	能在很大范围内适应容量和电压的要求,机械强度高,散热性能好,但绕制技术要求较高,且较费工。由1~6根扁导线在固定于绝缘筒或置于绕线模的撑条上并绕成饼状线段,线段间的联接如图25.1-27所示。线段数通常为偶数,段间用油道或用油道和纸圈交错隔开,两端有油道和绝缘圈	25.1-26d	可用于三相容量为630千伏安及以上、电压为3~110千伏的线圈。线段间用油道和纸圈交错隔开时,可用于三相容量为630~6300千伏安、电压为3~35千伏的线圈
双饼式	与连续式基本相似,以两个线段为一个单位,即所谓双饼。各双饼之间在套装后串联或并联焊接		用于电压为35千伏及以下的电炉、整流等特种变压器的线圈
纠结式	与连续式相似,但焊接头较多。线匝由一根导线组成时,用两根导线并绕,由两根导线并联组成时,用四根导线并绕。为了增大线圈匝间电容,使遭遇过电压时的电压分布更合理,其线匝不是依次排列的,而是交叉联接相联,见图25.1-28	25.1-26e	可用于三相容量为6300千伏安及以上、电压为110~330千伏的线圈
螺旋式	外形与连续式相似,其一匝相当于连续式的一段(单螺旋式)、二段(双螺旋式)或四段(四螺旋式)。绕制简便,但由于线圈高度限制,匝数稍多的线圈不能采用	25.1-26f及g	可用于三相容量为800千伏安及以上、电压为35千伏及以下的大电流线圈和有载调压变压器的调压线圈
铝箔筒式	与多层圆筒式相似,但每一层为一匝,铝箔的宽度等于线圈的高度。这种线圈具有空间利用率高,可自动绕制,生产效率高等优点	25.1-26h	可用于中小型变压器线圈

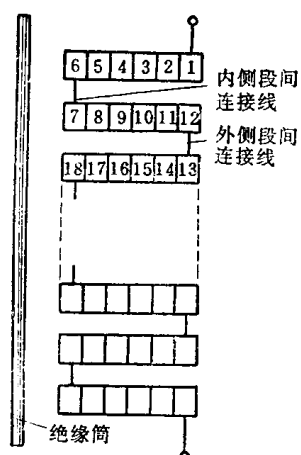


图 25.1-27 连续式线圈段间联接

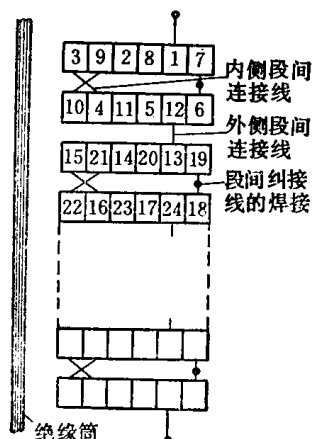


图 25.1-28 纠结式线圈段间联接(图示两段纠结式)

3.3.2 导线和电流密度的选择

a. 导线的选择

(1) 为了节约用铜,变压器容量为63000千伏安及以下时,通常采用铝导线,容量更大时则采用铝合金导线或铜导线;特种变压器或容量很小的变压器由于工艺等原因,也可采用铜导线。

(2) 常用的导线有漆包圆铝线(QQL-2或QZL-2)、纸包圆铝线(ZL)及纸包扁铝线(ZLB)等三种。从线圈制造工艺考虑,圆线优于扁线,但圆线空间利用率较差。常用漆包圆线的裸线直径为0.06~2.44毫米,纸包圆线的裸线直径为1.0~5.2毫米;直径在1.0~2.02毫米范围内时,可优先选用漆包圆线。选用扁导线时应注意导线截面的宽厚比。通常,扁