

# 第一篇 变 压 器

## 第一章 概 述

### 1-1 变 压 器 的 用 途

变压器是一种静止的电器，由绕在同一铁芯上的两个或两个以上的绕组（线圈）组成。通过电磁感应，可以把交流电源的电压适当地升高或降低，以满足不同的需要。

水电站要把自己生产的电能，输送到较远的地方去供用户使用或并入本地区的高压电网，都需要先用升压变压器把电压升高。这样，可以大大地降低线路损耗和电压降。当电能送到用户区，又必须用降压变压器把电压降低，以保证用户安全使用。所以，在水电站和电力系统中，变压器是一个主要的元件，不但数量多，而且要求性能好和运行安全可靠。

此外，在需要特种电源的工业企业中，如电炉、整流设备、量测设备、试验设备和控制设备等供电，也都广泛应用变压器。

### 1-2 变 压 器 的 结 构

变压器的基本工作原理是由一个共同的闭合磁路，把两个或两个以上的联接到不同电路上的绕组链在一起，通过电磁感应，把一个绕组从电源接受来的交变电能，传递到其余的绕组再传输出去，接到负载（负荷）。共同的磁路部分，一般用硅钢片叠成，称为铁芯。接到电源的绕组称为原绕组或原线圈，也叫一次

绕组、原边或初级。接到负载的绕组称为副绕组或副线圈，也叫二次绕组、副边或次级。图1-1是双绕组变压器的示意图。

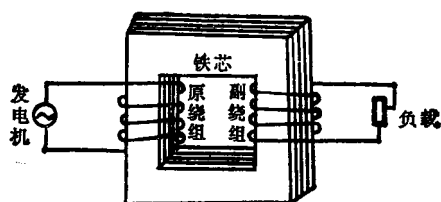


图 1-1 双绕组变压器示意图

通常的变压器都为油浸式，铁芯和绕组都浸入盛满变压器油的油箱中。各绕组的端点通过绝缘套管引至油箱外面，以便和外线路联接。因此，变压器的主要构成部分有：铁芯；带有绝缘的绕组；变压器油；油箱；绝缘套管等。现分述如下：

### 一、铁芯

通过变压器铁芯的磁通为一交变磁通。为要减少交变磁通在铁芯中感应产生的涡流，变压器的铁芯用彼此绝缘的、厚度为0.35毫米的电工钢片叠成。铁芯结构可分两部分：绕有绕组的部分，称为铁芯柱，用以闭合磁路的部分，称为磁轭。组成铁芯的钢片，应先裁成所需要的形状和尺寸，称为冲片。图1-2(a)表示单相

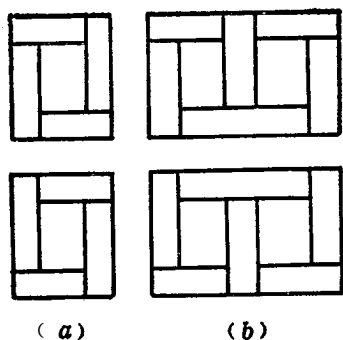


图 1-2 变压器铁芯的交迭装配  
(a)单相；(b)三相

变压器的铁芯，每一层由四片冲片组合而成。图1-2(b)表示三相变压器的铁芯，每一层由六片冲片组合而成。把每层钢片分成几片冲片后，在装配时，可在由冲片构成的铁芯柱上套上预先绕制好的绕组，然后再把构成磁轭的冲片镶入。如图所示，每两层的冲片组合应用不同的排列方法，使各层磁路的接缝互相错开。

这种装配方式称为交迭装配。这样做法的优点是可以避免涡流在钢片与钢片之间流通，且因各层冲片交错镶嵌，在把铁芯压紧时，可以少用穿过铁芯的螺杆而使铁芯的结构简单化。

只有当变压器的容量很小时，铁芯柱的截面才用正方形。当变压器的容量较大时，为更充分利用空间，可将铁芯截面分为两级或更多的级数。如图1-3所示，(a)为正方形铁芯；(b)为两级铁芯，亦称十字形铁芯；(c)为多级铁芯。当变压器铁芯柱的截面愈大时，所用的级数也愈多。

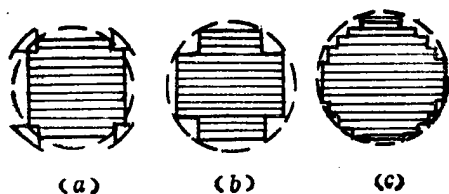


图 1-3 铁芯截面  
(a)正方形；(b)十字形，(c)多级铁芯

在容量较大的变压器中，为了保证铁芯的温度不致太高，在叠片间可以设置油槽。油槽分两种：(1)与钢片垂直；(2)与钢片平行，如图1-4(a)和(b)所示。第一种布置方式散热效果较好，但结构较为复杂。

## 二、绕组

绕组是用绝缘铜线或铝线绕成，按照绕组在铁芯上的排列方法来分类，变压器可以分为铁芯式和铁壳式两种外形，如图1-5所示。图1-6为铁芯式变压器的剖面 and 同心式圆筒形绕组，(a)为单相；

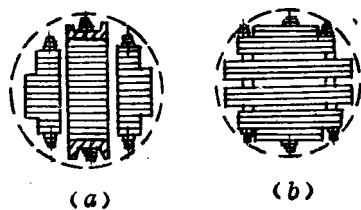


图 1-4 铁芯中的油槽  
(a)油槽和钢片垂直；(b)油槽和钢片平行

(b)为三相。由图可见，每个铁芯柱上都有低压绕组和高压绕组，低压绕组靠近铁芯柱，高压绕组则套在低压绕组的外面。对

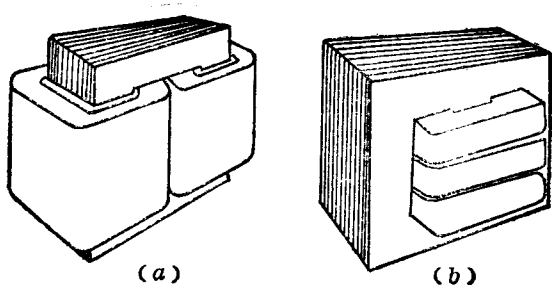


图 1-5 小型变压器外形  
(a)铁芯式; (b)铁壳式

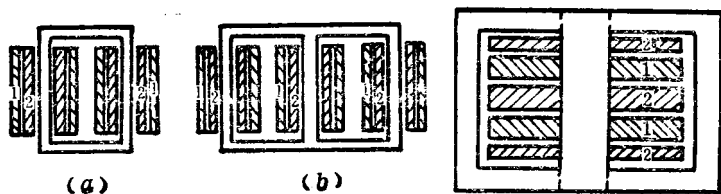


图 1-6 铁芯式变压器的剖面 and 同心式圆筒形绕组  
(a)单相; (b)三相  
1—高压绕组; 2—低压绕组

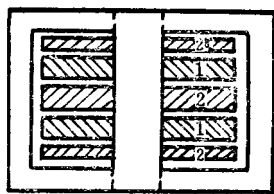


图 1-7 铁壳式变压器的剖面 and 交迭式绕组  
1—高压绕组; 2—低压绕组

于三相变压器，每一铁芯柱上的低压绕组和高压绕组属于同一相。对于单相变压器，低压绕组和高压绕组各分为两部分，分别排列在两边的铁芯柱上。图 1-7 所示为一单相铁壳式变压器的剖面。这种变压器的铁芯柱在中间，磁轭在两边环绕，且把绕组包围起来。铁芯式变压器的优点是制造工艺比较简单，高压绕组和铁芯间的绝缘较易。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，绕组与铁芯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，一般都用铁芯式。

变压器绕组的基本型式有同心式绕组及交迭式绕组两种。铁芯式变压器常用同心式绕组；铁壳式变压器常用交迭式绕组。如图1-5(a)和图 1-6所示，同心式绕组的高压绕组和低压绕组，制

成圆筒的形式，然后同心地套在铁芯柱上。把低压绕组套在里层，把高压绕组套在外层便于绝缘。交迭绕组又称饼式绕组。如图1-5(b)和图1-7，高压绕组和低压绕组各分为若干线饼，沿着铁芯柱的高度交替地排列着。为了排列得对称起见，也为了使高压绕组能够离开磁轭远一些以便于绝缘，图1-7中的高压绕组分为两个线饼，低压绕组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。交迭式绕组仅用于铁壳式变压器，故应用不多。铁芯式变压器应用同心式绕组，是电力变压器的主要结构形式。

### 三、变压器油

除了极少数例外，装配好了的变压器铁芯和绕组都须浸入变压器油中。变压器油既是很好的绝缘介质，又作为散热的媒介。变压器油为矿物油，由石油分馏得来。

### 四、油箱及附件

电力变压器的油箱一般都做成椭圆形，因为它的机械强度较高，所需的油量较少。为了防止潮气浸入，希望油箱内部和外界空气隔绝。为此，在油箱上面装一油枕（亦称膨胀器或储油器），以减少油和空气的接触面，降低油的氧化速度和侵入变压器油的水分。油枕为一圆筒形的容器，装在油箱盖上，用管道与变压器的油箱接通，使油面的升降限制在油枕中。油枕上部的空气通过存放氯化钙等干燥剂的通气管（亦称呼吸器），和外界自由流通。油枕底部有沉积器，以沉聚侵入油枕中的水分和污物，定期加以排除。通过玻璃油位表，可以看到油枕中油面的高低。变压器油箱上的油枕，如图1-8中所示。通常容量超过75千伏安或高压绕组额定电压超过6.3千伏的变压器，才在油箱上装置油枕。

装在油箱顶盖上的另一附件排气管（亦称安全气道或防爆管），是作为保护设备用的，如图1-8中的4。它是一个长钢管，上端装有一定厚度的玻璃板或酚醛纸板（防爆膜）。当变压器内部发生严重的故障而有大量的气体形成时，油箱内的压力超过

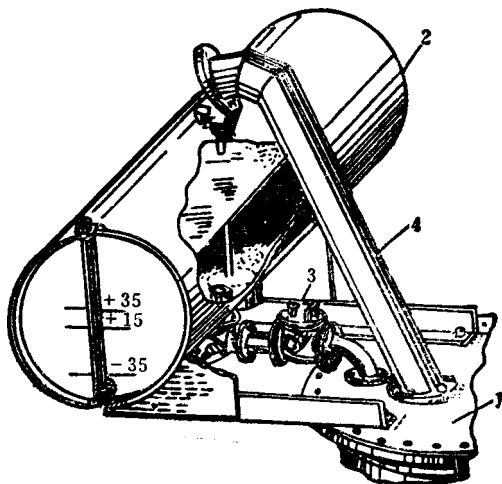


图 1-8 油枕和防爆管

1—油箱；2—油枕；3—气体继电器；4—防爆管

0.5个大气压，油流和气体将冲破防爆膜向外喷出，以免油箱受到强烈的压力而爆裂。

气体继电器（瓦斯继电器）是当变压器内部发生故障产生气体时，或油箱漏油等使油面降低时，保护变压器用的。届时它可以发出警报或切断变压器的电源。

### 五、绝缘套管

绝缘套管由外部的瓷套与中心的导电杆组成。它穿过变压器的箱壁，其导电杆在油箱中的一端与绕组的端点相接，在外面的另一端则和外线路相接。当变压器的电压不高时，可用简单的瓷制空心式套管。随着电压的提高，套管的结构就愈为复杂，尺寸也愈来愈大。为了加强绝缘能力，可在瓷套和导电杆间充油。当电压更高时，在套管内腔中，除了充油以外，环绕着导电杆，还可包上几个同心绝缘纸筒，而在这些纸筒上贴附一层均压铝箔。这样，则沿着套管的径向距离，绝缘层和铝箔层构成一系列的串联电容器。套管内部的电场便将均匀分布而使它的绝缘性能增强。图1-9为35千伏的瓷制充油式套管。

### 1-3 变压器的发热和冷却

变压器在工作时，铁芯及绕组中有能量损耗，这些能量损耗一方面影响变压器运行时的效率；另一方面，损耗转变为热能，引起变压器发热，使变压器的温度升高。当其温度高于冷却介质的温度时，就开始向冷却介质散出热量。散热的快慢，决定于变压器温度与冷却介质的温度之差和变压器的散热能力。在一定条件下，温差愈大，散热愈快。因此，在一定的负载下，变压器的温度将逐渐升高，直到散出去的热量等于产生的热量时，温度就不再升高，保持一定的对冷却介质的温升值。温升过高，将使绝缘材料破坏而失去绝缘能力，或减短它的有效使用寿命，还将增大绕组的电阻因而使铜耗增加。因此，需要规定变压器在额定负载时，各部分的温升不超过一定的数值。

要降低温升，有两种方法：一方面在设计时提高变压器的效率，减少损耗；另一方面是提高变压器的散热能力，使它更有效地冷却。散热能力与变压器的结构布置和所采用的冷却方式有关。

最初的变压器，都是空气冷却的。后来，随着变压器容量的不断增大，电压等级不断提高，用空气冷却和作为绝缘就越来越困难，因此产生了油浸变压器，这是目前最通用的冷却方式，即把变压器器身（铁芯和绕组），浸在盛于铁箱中的油内。变压器油有很好的绝缘性能，还作为一个散热的媒介。铁箱除了作为油的容器外，还提供一个对周围空气的散热面。

油浸变压器的绕组和铁芯的温度，是下部低上部高。平常量

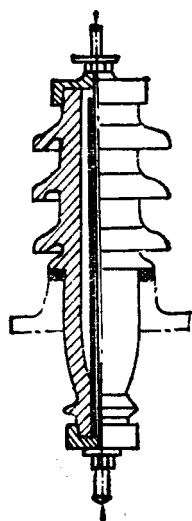


图 1-9 35千伏瓷制  
充油式套管

测的是上部油温（油的最高温度）和绕组的平均温度，平均温度是通过量测绕组电阻的变化计算出来的。在一般变压器中，绕组的最高温度和平均温度相差约 $15^{\circ}\text{C}$ 。

变压器的绕组均用 A 级绝缘。根据我国的气候情况，国家标准规定，以  $+40$  作为周围冷却空气的最高温度，并据此规定变压器各部分的容许温升，如表 1-1。

表 1-1 变压器主要部分的容许温升

变 压 器 部 分	最 高 温 升 ( $^{\circ}\text{C}$ )	测 量 方 法
绕 组	65	电 阻 法
铁 芯 表 面	70	温 度 计 法
油(顶层)	55	温 度 计 法

由于没有旋转部分带动气流，变压器的冷却要比旋转电机更为困难。当变压器的容量增大时，散热面积的增加跟不上损耗的增加，因而更需要采取强有力的冷却方式。变压器的冷却方式，可分为以下几种：（1）油浸自冷式；（2）油浸风冷式（人工通风）；（3）强制油循环冷却式。

油浸自冷式变压器的绕组和铁芯中发出的热量，完全依靠油的对流作用传至油箱壁，然后由油箱壁的辐射作用和周围冷却空气的自然对流作用发散至外面。

油浸风冷式变压器是在变压器油箱的各个散热器上，安装一个或几个风扇，把自然对流作用改为强制对流作用，用以增加散热器表面的散热能力。

更大型的变压器，可采用强制油循环冷却式，兹不赘述。

## 1-4 国产变压器简介

建国以来，我国电力变压器的生产和制造技术有了迅速发

展，现在已能生产 600 千伏电压等级、容量达 36 万千伏安的巨型电力变压器。

容量大于 63000 千伏安，电压高于 110 千伏的电力变压器，因电压组合及技术要求都比较单一，大多属于单台生产，并且这些产品的性能还在不断改进，所以尚未形成系列。容量小于 63000 千伏安，电压低于 110 千伏的电力变压器，我国已列入系列生产，它们的技术数据可以从有关手册查到。

我国已制定了新的《电力变压器国家标准》。它规定的符号含义如表 1-2 所示。但目前还有许多旧标准变压器在运行，故表中也将旧标准列出参考。

表 1-2 变 压 器 型 号 含 义

分 类 项 目	代 表 符 号		分 类 项 目	代 表 符 号	
	新	旧		新	旧
单相变压器	D	D	强迫油导向循环	D	—
三相变压器	S	S	双绕组变压器	—	—
油浸式	—	J	三绕组变压器	S	S
空气自冷式	—	—	自耦变压器	O	O
风冷式	F	F	无励磁调压	—	—
水冷式	W	S	有载调压	Z	Z
油自然循环	—	—	铝线变压器	—	L
强迫油循环	P	P			

按表 1-2 所列符号顺序书写，组成基本型号，其后加一短横，再加注额定容量（千伏安）/ 高压绕组电压等级（千伏）。例如，三相油浸自冷双绕组铝线 500 千伏安 10 千伏电力变压器，新型号表示为 S-500/10；旧型号表示为 SJL-500/10。又如三相强迫油循环风冷式双绕组铝线 63000 千伏安 110 千伏电力变压器，新型号表示为 SFP-63000/110；旧型号表示为 SFPL-63000/110。

我国生产的电力变压器除了容量、电压等级不断扩大外，在生产技术方面，也不断采用新技术。

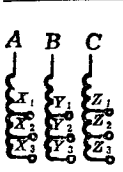
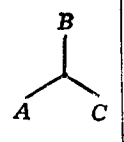
例如，为了使变压器铁芯的生产过程便于实行机械化、自动

化，我国许多工厂已生产渐开线式铁芯。这种变压器的铁芯结构比较特殊。把若干张一定尺寸的硅钢片分别卷成渐开线状，然后迭成圆柱形的铁芯柱。用宽度等于铁轭高的条状硅钢片卷成三角形状构成铁轭。三个铁芯柱按等边三角形布置。铁芯柱和上下铁轭依靠穿心螺杆固定在一起。这种铁芯结构使三相磁路完全对称，缩小了尺寸，并且可以节约材料。但由于受硅钢片标准尺寸的限制，同时振动、噪声等问题也有待改进，目前最大的渐开线式铁芯变压器，容量为8000千伏安。

### 1-5 变压器的额定值和铭牌数据

为了变压器安全、经济地运行，并保证一定的使用寿命，制造厂对它规定了额定值或额定数据，并按额定值进行设计和试验。如按这种规定来运行，就叫额定运行。变压器的额定数据写在铭牌上，如表 1-3 所示。在正确使用变压器时，首先要掌握铭

表 1-3 铝 线 电 力 变 压 器

产品标准：				型号：S-1000/10				
额定容量：1000千伏安				相数：3		额定频率：50赫芝		
额定电压		高压：10000伏		额定电流		高压：57.7安		
		低压：400/230伏				低压：1443安		
使用条件：户外式				油面温升：55°C				
短路电压：4.94%				冷却方式：油浸自冷式				
接线联接图		相量图		联接组 标号	开关 位置	分接头 电压		
高压	低压	高压	低压					
				Y/Y <sub>0</sub> -12	I	10500		
						II	10000	
							III	9500

牌上的这些技术数据。

(1) 变压器的型号：其表示符号的意义已如上节所述。

(2) 额定容量 $S_e$ ：制造厂所规定的额定使用条件下变压器输出能量的保证值（伏安或千伏安）。

(3) 额定电压 $U_{1e}$ 和 $U_{2e}$ ：制造厂所规定的变压器各线圈在空载时额定分接头上的电压的保证值（伏或千伏）。原边额定电压 $U_{1e}$ 为在正常运行情况下应该接至原边端点间的电压。副边额定电压 $U_{2e}$ 为当原边电压有额定值时，副边端点间的空载电压。对三相变压器而言，如不加申明，额定电压系指线电压。

(4) 额定电流 $I_{1e}$ 和 $I_{2e}$ ：变压器的额定容量除以各绕组的额定电压所计算出来的线电流值（安），它们之间的关系为：

$$\text{单相变压器 } S_e = U_{1e} I_{1e} = U_{2e} I_{2e} \quad (1-1)$$

$$\text{三相变压器 } S_e = \sqrt{3} U_{1e} I_{1e} = \sqrt{3} U_{2e} I_{2e} \quad (1-2)$$

(5) 额定频率 $f_e$ ：即我国的标准工业频率50赫。

(6) 容许温升：已如1-3节所述。

(7) 短路电压：也叫阻抗电压，它的意义参看2-4节。

(8) 联接组：将在第三章讨论。

## 小 结

(1) 变压器是一种通过电磁感应过程把交流电压升高或降低以满足各种不同需要的一种静止电器。

(2) 变压器的主要构成部件有铁芯，原、副绕组，变压器油，油箱及主要部件，绝缘套管等。

(3) 变压器的额定值有额定容量 $S_e$ ，额定电压 $U_{1e}$ 及 $U_{2e}$ ，额定电流 $I_{1e}$ 及 $I_{2e}$ 。它们的关系是：单相 $S_e = U_{1e} I_{1e} = U_{2e} I_{2e}$ ，三相 $S_e = \sqrt{3} U_{1e} I_{1e} = \sqrt{3} U_{2e} I_{2e}$ 。三相变压器的额定电压和额定电流，均指线电压和线电流。

(4) 变压器在运行时，铁芯中的涡流和磁滞损耗以及原、副绕组中的铜耗均转变为热。故变压器必须采用各种冷却方式和不同的箱体结构散热，以免变压器温升过高造成事故和影响

寿命。

(5) 国产变压器的型号表示方法：第一部分的字母表示变压器的相数、冷却方式、绕组数目、调压方式等等；第二部分的数字表示额定容量（千伏安）；第三部分的数字表示高压绕组的电压等级（千伏）。

### 思 考 题 一

1. 普通变压器的用途是什么？
2. 变压器有哪些基本结构元件？它们的功用是什么？
3. 变压器的额定容量、额定电流、额定电压都代表什么意思？它们之间有什么关系？
4. 变压器采取哪些冷却方式？
5. 国产变压器的铭牌型号、文字和数字符号是什么意思？

### 习 题 一

1. 设有—500千伏安、三相、35000/400伏双绕组变压器，原、副边绕组均系Y联接，试求高压边和低压边的额定电流。

[8.25安，722安]

2. 设有—1600千伏安、三相、35/10.5千伏、Y<sub>0</sub>/△联接的双绕组变压器，试求高压绕组和低压绕组的额定电流和额定电压。高低压两边的额定线电流、线电压各为多少？

[26.4安，50.8安，20.2千伏，10.5千伏；26.4安，88安，35千伏，10.5千伏]

## 第二章 变压器的运行分析

### 2-1 变压器的基本工作原理

图2-1为简单单相双绕组变压器，原绕组有 $w_1$ 匝，副绕组有 $w_2$ 匝。在原绕组的两端外施一正弦交流电压 $u_1$ ，则原绕组中将有一交变电流 $i_1$ 流入，因而在铁芯中激励一交变磁通 $\Phi$ 。 $u_1$ 、 $i_1$  ( $i_0$ )和 $\Phi$ 的正方向如图所示。设在两绕组之间没有漏磁通，即全部磁通 $\Phi$ 同时穿过原、副绕组（与原、副绕组均相链的磁通，通称主磁通），则在原、副绕组内都将产生感应电动势。假设磁通为正弦变化，即 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，则在原绕组中产生的感应电动势为

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (2-1)$$

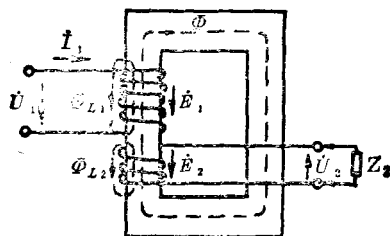


图 2-1 简单变压器

且较磁通滞后 $90^\circ$ 。式中， $E_{1m}$ 为原绕组中感应电动势的最大值 $E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m$ 。则感应电动势的有效值为

$$E_1 = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f w_1 \Phi_m \text{ 伏} \quad (2-2)$$

同理，在副绕组中的感应电动势的瞬时值为

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (2-3)$$

有效值为  $E_2 = 4.44f w_2 \Phi_m$  伏 (2-4)

由于  $e_1$  和  $e_2$  是由同一磁通所感应，它们是同相的。将式 (2-2) 和式 (2-4) 相比，可得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad (2-5)$$

即变压器的原、副绕组的感应电动势之比与其匝数成正比。比值  $k$  称为变压器的变比，是变压器的一个重要参数。一般常取  $w_1 > w_2$  即  $E_1 > E_2$ ，故  $k$  常大于 1。

由于实际变压器的原、副绕组总有点电阻，两绕组之间总有漏磁通  $\Phi_{L1}$ ，故端电压  $U_1$  和  $U_2$  与  $E_1$  和  $E_2$  之间，总要差一个阻抗电压降。但这个阻抗电压降和感应电动势相比是很小的，因此原边额定电压  $U_{1e} \approx E_1$ ，副边额定电压  $U_{2e}$  等于副边空载电压  $U_{20} = E_2$ ，故

$$\frac{U_{1e}}{U_{2e}} \approx \frac{E_1}{E_2} = k \quad (2-6)$$

即由于原、副绕组的匝数不同，变压器起到了变压作用。所以在设计时，选择适当的原、副绕组的匝数比，可以把原边电压变到所需要的副边电压。

当副边未接上负载，即副边开路时，副边电流为零。而此时原边电流  $I_1 = I_0$ ，称为空载电流即励磁电流，它只是为了激励铁芯中的磁通，故数值很小。当副边接上负载后，副绕组中就有电流  $I_2$ 。这个电流产生的磁通企图改变铁芯中的原磁通。但原边电压未变，原边的感应电动势也应基本不变，根据式 (2-2)，铁芯中的磁通  $\Phi$  也应基本不变，故原边将同时有电流增加以产生磁通来平衡副边电流所产生的磁通。设此时原边的总电流为  $I_1$ ，则根据图 2-1 所示的正方向，磁势平衡方程式将为

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1 \quad (2-7)$$

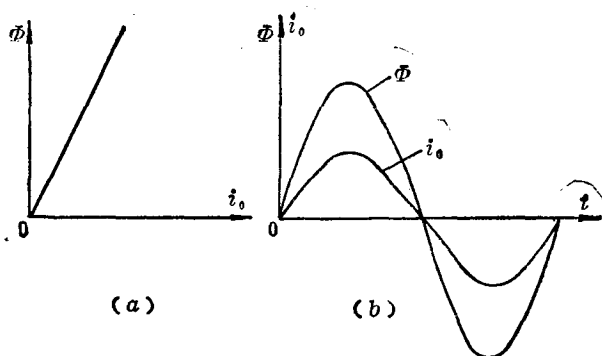
如略去空载电流  $I_0$ ，则上式变为

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 \approx 0 \text{ 或 } \frac{I_1}{I_2} \approx -\frac{w_1}{w_2} = -\frac{1}{k} \quad (2-8)$$

即变压器的原、副绕组的电流，基本上与原、副绕组的匝数成反比。即原、副绕组的电流，基本上与原、副绕组的电压成反比。负号表示  $I_1$  与  $I_2$  反相。

## 2-2 变压器的空载情况

如前所述，激励铁芯磁通的电流即为空载电流  $I_0$ 。当不考虑铁芯损耗而铁芯又不饱和时，磁通  $\Phi$  与电流  $i_0$  是线性关系（图 2-2a）。 $i_0$  应与  $\Phi$  同相，如图 2-2(b) 的波形图所示。



铁芯不饱和时的电流波和磁通波  
(a)磁化曲线；(b)磁通波和励磁电流波

### 一、变压器的铁芯的磁化曲线、磁通波和励磁电流波

当实际变压器的铁芯磁通密度为 8000~13000 高斯时，磁化曲线转入弯曲部分；当磁通密度超过 13000 高斯时，磁化曲线即进入饱和部分。由于磁路饱和的影响，励磁电流便不再和磁通成线性关系，而将增加得较磁通为更快。如磁通波依然保持着正弦波形，则励磁电流波将有尖顶波形。励磁电流波仍可从磁化曲线及磁通波求得，如图 2-3 所示。由图可见，励磁电流波  $i_0(t)$  的波形虽受到畸变，但仍和磁通波  $\Phi(t)$  的基波同相，也就是比感应

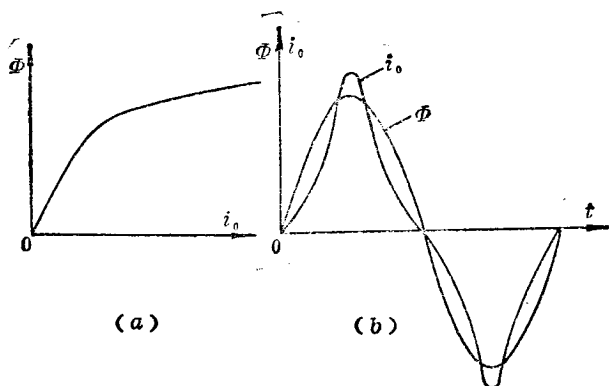


图 2-3 当磁路饱和但不计磁滞损失时的励磁电流  
(a)磁化曲线； (b)磁通波和励磁电流波

电动势超前 $90^\circ$ ，比外施电压基本上滞后 $90^\circ$ 。因而励磁电流仍为一纯粹的无功电流。

尖顶的励磁电流波如按富氏级数进行谐波分析，则除基波外还包含有许多奇次谐波，而其中以三次谐波幅值为最大。这个三次谐波分量必须能够流通，否则，根据磁化曲线和正弦形的励磁电流波反过来求得磁通波为一平顶波，它也含有一定的谐波分量，因而使绕组中的感应电动势波也含有谐波分量。为了避免感应电动势波畸变，必须保证励磁电流中的三次谐波分量能够流通。

尖顶的励磁电流波不是正弦形，严格说来不能用相量表示。但在实际运行情况下，由于空载电流大大小于负载电流，故也把测得的空载电流的有效值用一相量来代表。

在实际情况下，用交变电流励磁时还有磁滞作用，即磁化曲线成为图 2-4(a) 中的磁滞回线。这时，为了得到正弦波磁通，所需的励磁电流波不但为一尖顶波，且较磁通波的相位略为超前，如图 2-4(b) 所示。此外，交流励磁还在铁芯中产生涡流。故为供给变压器的铁芯损耗（磁滞损耗和涡流损耗），空载电流  $I_0$  还包含有微小的有功分量  $I_{0y}$ 。而纯粹励磁无功分量（磁化分量）则用符号  $I_{0w}$  表示（当然还包含有显著的三次谐波分量）。因此，

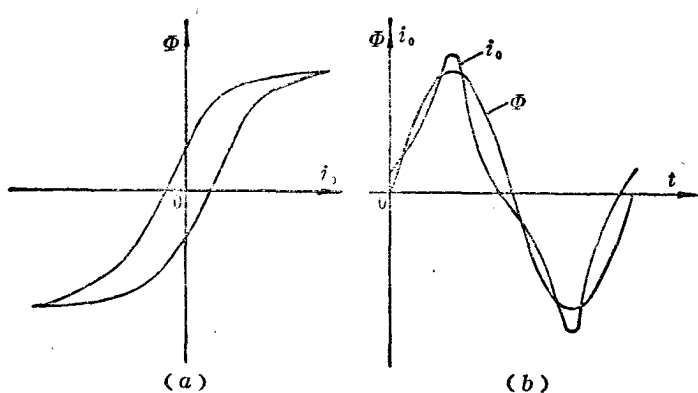


图 2-4 有磁滞作用的励磁电流  
(a) 磁滞回线；(b) 磁通波和励磁电流波

$$I_0 = \sqrt{I_{0y}^2 + I_{0w}^2} \quad (2-9)$$

## 二、电压平衡方程式和相量图

实际变压器的原绕组总有一点微小电阻  $r_1$ ，空载电流  $I_0$  会引起电阻电压降  $I_0 r_1$  与  $I_0$  同相。同时，空载电流在原绕组中，必然产生很小部分不与副绕组相链而通过空气自行闭合的漏磁通  $\Phi_{L1}$ ，它产生的感应电动势，通称漏磁感应电动势  $E_{L1}$ ，其效果相当于一个漏磁电抗  $x_1$  的电压降  $j\dot{I}_0 x_1$ ，相位较  $I_0$  超前  $90^\circ$ 。故空载时原边的电压平衡方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_0 x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (2-10)$$

副边因为是开路，故  $\dot{E}_2 = \dot{U}_{20}$ 。因此整个相量图如图 2-5 所示。

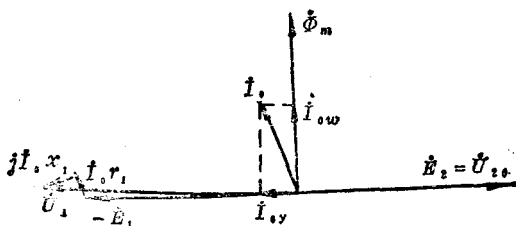


图 2-5 变压器空载时的相量图