



变 压 器 研 究

(电机实验参考书)

苏联莫斯科动力学院

电机教研组编

高等教育出版社



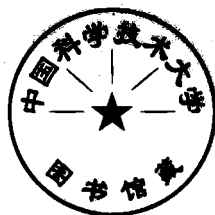
变 压 器 研 究

(电机实验参考书)

苏联莫斯科动力学院电机教研组编

周希贤译

潘曙光校



高等教育出版社

本书系根据苏联莫斯科动力学院(Московский энергетический институт)1957年出版的该院电机教研组所编“变压器研究(电机实验参考书)”(Исследование трансформаторов(Восполне к лаборатории электрических машин))译出。原书经该院教务处审定为学生用教学参考书,但对于相应的制造厂及使用企业也有参考价值。

本书共包括四个实验,即:实验一,三相双绕组变压器;实验二,第一部分,三相三绕组变压器的研究,第二部分,自耦变压器的研究;实验三,三相变压器的并联运行;实验四,三相变压器不平衡负载的研究。结论和实验一是 П. М. 季霍米罗夫(Тихомиров)副教授编写的,实验二是 С. С. 奥库尼(Окунь)副教授和季霍米罗夫副教授合编的,实验三是 В. Л. 克赖兹(Крайз)助教编写的,实验四是 А. И. 阿勃腊莫夫(Абрамов)技术科学副博士编写的。本书的主编者是季霍米罗夫副教授。

变 压 器 研 究

(电机实验参考书)

苏联莫斯科动力学院电机教研组编

周希賢译 潘曙先校

高等教育出版社出版 北京宣武门内承恩寺7号

(北京市书刊出版业营业许可证书字第054号)

京华印书局印装 新华书店发行

统一书号 15010·804 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 111 $\frac{1}{16}$

字数 36,000 印数 0001—4,000 定价(7) 0.26

1959年7月第1版 1959年7月北京第1次印刷

目 录

緒論.....	1
实验一、三相双繞組变压器.....	6
实验二、第一部分三相三繞組变压器的研究.....	21
第二部分自耦变压器的研究.....	26
实验三、三相变压器的并联运行.....	31
实验四、三相变压器不平衡負載的研究.....	38

緒 論

工厂生产的每一台变压器，为了檢驗其制造及选用材料的质量，必須給以例行的試驗。每种新型結構的变压器須給以型式試驗。电力变压器例行和型式試驗的范围、性質及方法在国家标准ГОСТ 3484-46中都已規定。对于其他的变压器則定有特殊的技术条件。

在变压器实验的大綱中包含有某些例行的及其他的試驗，当变压器在各种不同联接和不同負載条件等情况下运行时，这些試驗可以研究其各种不同的运行状况。

电机教研組变压器实验室中的全部研究工作，是在三相TC-5/0.5(三相干式，容量5千伏安，电压0.5千伏)干式变压器上进行的。变压器鉄心为矽鋼片所迭成，磁路系統是三相不对称的，具有水平的鉄心柱和垂直的鉄軛。鉄心柱截面积是四級阶梯形，有效面积为 $S_0 = 52.5$ 公分²。鉄軛是十字形，有效面积 $S_x = 56$ 公分²。鉄心的主要尺寸已表明在图 I 上。

变压器繞組是交錯式的。每一鉄心柱上的繞組分为二个磁平衡組。每一組具有一个双段式綫卷的高压繞組 BH，它放在两个串联的双段式低压繞組 HH 之間(图 II)。高压繞組的每一双段式綫卷具有 96 匝，每一鉄心柱共 192 匝。低压繞組双段式綫卷的每一段具有 30 匝，二个串联有 60 匝，每一鉄心柱共 120 匝。

因此，变压器的每相繞組 BH 及 HH 可分为二組，它們可以串联或并联。这样可以将繞組接成星形或三角形。为了接綫方便，繞組 BH 的全部始端及末端都引至接綫板上(图 III)。繞組 HH 的始端及末端也引至接綫板上(图 IV)。

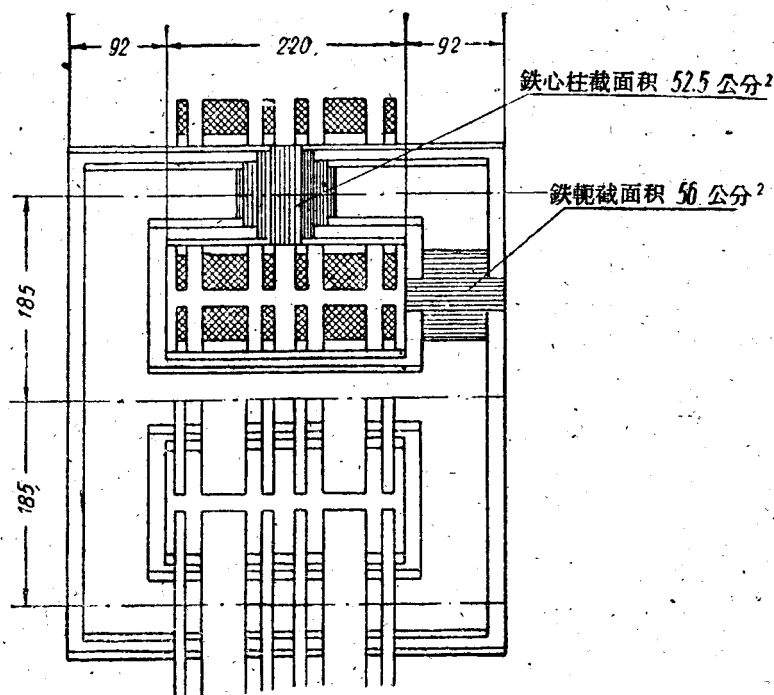


图 I. 带有绕组的变压器铁心。

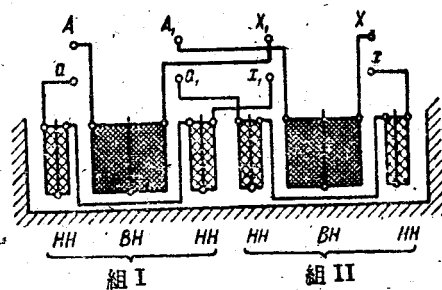


图 II. 绕组在铁心柱上的安排。

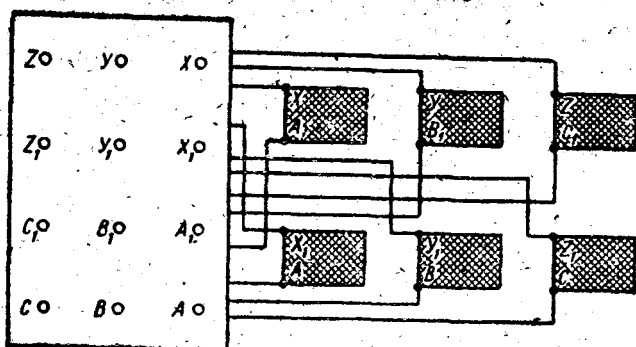


图 III. 繞組 BH 在接綫板上的出綫头。

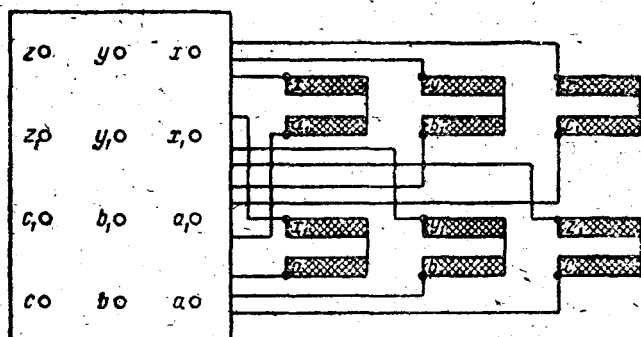


图 IV. 繞組 HH 在接綫板上的出綫头。

繞組 BH 的額定数据——綫电压 400 伏, 綫电流 7.22 安——当繞組 BH 兩組串联且三相接成星形时可获得。繞組 HH 的两个組, 当考虑作为两个独立的星形联接的三繞組变压器时, 每一繞組的額定数据为: 綫电压 125 伏, 綫电流 11.55 安。当研究双繞組变压器时, 二繞組并联, 具有同样的額定綫电压 125 伏及双倍的电流 23.1 安。

变压器的額定及其他数据都注明在名牌上; 制造厂的名称, 型号, ГОСТ 序号, 工厂编号, 出厂年份, 相数, 频率(赫芝)安装方式(戶内或戶外), 額定容量(千伏安), 繞組的接綫图及联接組, 各繞

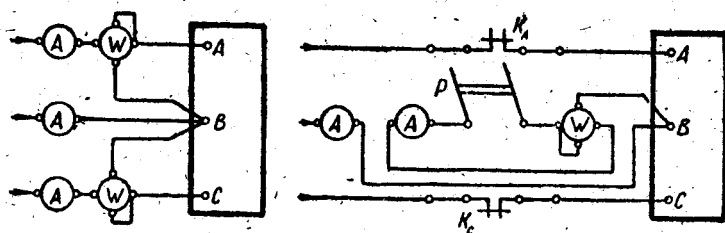


图 7.

组的额定电压(伏)及电流(安), 短路电压(%), 冷却方式。

当进行变压器实验一和二时, 三相功率是用二瓦计法测量的。包括两个瓦特计的示意接线图已叙述于相应的各实验的课文中。实际上, 当按照这种接线图测量功率时, 仅利用一个瓦特计, 该瓦特计借转换开关轮流接入两个线路(图 7)。当开关 P 投入上面位置时, 触点 K_A 被打开, 瓦特计的串联绕组被接入导体 A 的线路中。当开关在下面位置时, 触点 K_C 被打开, 瓦特计的串联绕组被接入导体 C 的线路中。瓦特计的并联绕组的一端接至线路或 B 端, 而另一端接至串联绕组。安培计与瓦特计串联时, 可以利用一个安培计测量线路 A 和 C 中的电流。

在变压器实验室中所采用的瓦特计其电流量程为 12.5 及 25 安, 电压为 30 伏。当测量较高电压的线路时, 在瓦特计的电压线卷中串联附加电阻, 这样可以允许增加测量范围到 120, 240, 420 及 600 伏。

在进行装置任一实验线路之前, 应该预定被测电压和电流的数值范围, 并选择接近最大测量范围的仪表(安培计, 伏特计及瓦特计)。

在装置线路及进行测量时应该考虑到仪表的损耗。当测量相当小的功率时, 仪表的损耗可能相当大, 致使测量的结果引起可观的误差。为了避免引起较大的误差, 必须对每种不同的情况采用

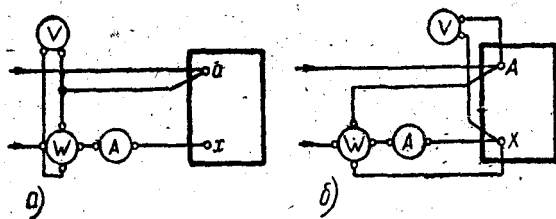


图 VI.

不同的接綫方法,以使仪表損耗对測量結果影响最小,且在估計測量結果时考慮到仪表的实际損耗。例如,按图 VI-a 測量功率时,瓦特計指示的功率等于被测功率,瓦特計串联繞組的損耗,以及安培計繞組損耗的总和。按图 VI-b 接綫时則包括被测功率,瓦特計并联繞組的損耗及伏特計繞組的損耗。变压器空載試驗时,按图 VI-a 接綫測量功率所得誤差最小,而短路試驗时則按图 VI-b 接綫。

为了修正仪表的損耗,應該在瓦特計的讀数中扣除那些被計入总功率的仪表的損耗,其中也包括瓦特計本身的損耗。这时,安培計或瓦特計串联繞組中的損耗按公式 $P_{np} = I^2 R_{np}$ 确定,而伏特計或瓦特計并联繞組中的損耗按公式 $P_{np} = \frac{U^2}{R_{np}}$ 确定,式中 R_{np} —仪表繞組的电阻, I —仪表繞組的电流, U —仪表的端电压。

实验一、三相双绕组变压器

变压器空载及短路时的研究

每个变压器都为下列特征所表明：额定容量，相数，电流的频率，绕组数目及其额定电压，绕组的接线图及联接组。根据这些数据，变压器可以进行设计和制造。为了满足变压器全部的运行要求，它还应该具有 ГОСТ 或特殊技术条件所规定的许多特征。

照例，对所有变压器所规定的特性中包含有空载电流及损耗，短路电压及损耗，效率，以及在额定运行时副边电压的变化。这些特性可以根据空载和短路试验来确定，空载和短路试验是每一个电力变压器在出厂之前所必须进行的例行试验。

空载和短路试验所确定的特性可用以研究变压器各种不同的运行状况。空载损耗和电流确定变压器激磁所必须的有功和无功功率。变压器绕组中故障短路时的电流以及负载时副边电压的变化决定于短路电压。当选择并联运行用的变压器时也要考虑到短路电压。空载和短路时的损耗可用以确定变压器的效率。

实际上，我们常遇到空载特性和短路特性的两种概念。一种概念是额定电压时的空载特性和额定电流时的短路特性的数值。另一种概念是这些数值与电压和电流的关系，它们常用曲线或分析方法表示。

本实验的任务是对被研究的三相双绕组变压器进行空载和短路试验，作出空载和短路特性，并计算出变压器额定运行时的某些特性。

实验提綱

1. 确定变比。

2. 进行空载試驗。实验时利用示波器以记录变压器的电流，电网电压及副边电压的波形。

3. 进行短路試驗。

根据試驗数据：

1. 当 Y/Y 及 Δ/Y 联接时，计算綫电压的变比。

2. 作出空载特性：

$$I_x = f(U_1); P_x = f(U_1); \cos\varphi_x = f(U_1)。$$

3. 找得在額定电压 U_n 时的空载电流 I_x ，其有功分量 I_a 及无功分量 I_p ， $\cos\varphi_x$ 及空载損耗 P_x ，以及計算变压器鉄心中的磁感应。

4. 作出空载电流 $i_x = f(t)$ 在一个周期内的曲线。

5. 作出短路特性：

$$U_K = f(I_K); P_K = f(I_K); \cos\varphi_K = f(I_K)。$$

6. 确定折算至温度 75°C 时的短路电压 U_K 的百分值，其有功分量 u_a 及无功分量 u_p ，以及短路損耗 P_K 及 $\cos\varphi_K$ 。

7. 当 $U_1 = U_n$ ，額定电流 ($\beta = 1$) 及 $\cos\varphi_2 = 0.8$ 时，确定副边端电压 U_2 及效率。

实验說明及指示

所研究的对象是具有交錯盘式繞組的三相鉄心式变压器(見緒論)。在实验开始前，應該先熟悉变压器名牌，并记录名牌上所注明的額定数据。

1. 变比的确定

当 Y/Y 及 Δ/Δ 联接组时, 线电压的变比实际上就等于绕组 BH 及 HH 的匝数比:

$$k = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} = \frac{W_{BH}}{W_{HH}}$$

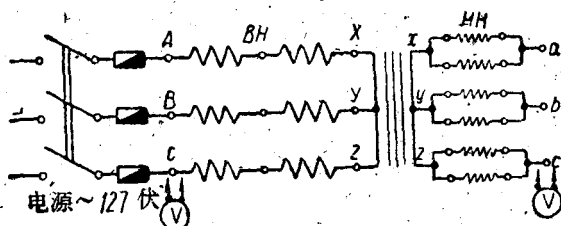


图 1.

当 Y/ Δ 或 Δ /Y 联接组时:

$$k = \sqrt{3} \cdot \frac{W_{BH}}{W_{HH}} \text{ 或 } k = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{W_{BH}}{W_{HH}}$$

按图 1 的接线, 变压器空载运行时可以确定变比。将变压器副边绕组开路, 原边接至电源, 以伏特计测量原边及副边的电压。这数值与那一个绕组与电源相接有关。由试验可得

$$\frac{U_1}{U_2} = k \text{ 或 } \frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{k}$$

为了避免可能由于电网电压振荡所引起的误差, 伏特计在原边和副边的读数应该同时读取(根据同一信号)。

测量变比时与哪一绕组接至电源并无关系, 但是为了试验时不希望副边电压超过 250 伏, 建议将绕组 BH 作为原边。

确定 Y/Y 联接组时的变比, 同样也确定 Δ /Y 联接组时的变比。

按照 ГОСТ, 变比 k 与额定电压比值之间的差别对于 $k < 3$ 的

变压器不应大于 $\pm 1\%$, 对所有其他的变压器不应大于 $\pm 0.5\%$ 。

记录试验数据并建议填入表 1 形式的表格。

表 1. 变比的确定

联接组	U_{AB}	U_{ab}	k	U_{BC}	U_{bc}	k	U_{CA}	U_{ca}	k	$k_{\text{средн}}$
Y/Y										
Δ/Y										

2. 空载特性

进行空载试验是为了确定变压器的空载电流和损耗。按照 ГОСТ, 在变压器的一个绕组上施以额定电压和额定频率, 而使双绕组变压器的另一绕组开路, 或使三绕组变压器的其余二绕组开路时, 所得的电流称为空载电流。在这种运行情况下, 变压器内所产生的损耗称为空载损耗。空载电流通常用额定电流的百分数来表示。

空载试验按图 2 的线路进行。让变压器的副边开路, 原边接至频率为 50 赫芝的电源。试验时测量变压器的端电压, 线电流以及从电网所吸取的功率。进行试验时常不局限于额定电压一点, 而作出在不同电压 U_1 时的空载特性

$$I_x = f(U_1); P_x = f(U_1); \cos \varphi_x = f(U_1).$$

电压通常在 $U_1 = 0.5U_{1n}$ 到 $U_1 = 1.2U_{1n}$ 的范围内变化, 每隔 10—15 伏测量一次。同时希望其中有一点是在额定电压 U_{1n} 时测量的。

进行试验时, 为了不使电压大于 250 伏, 建议将变压器 HH 方面接向电源而让绕组 BH 全部开路, 如图 2 所示。

在实验室中采用三相感应调压器以调节电压。当变压器接至调压器之前, 应该保证后者的端压为最小。同时也要检验一下调压器的三相电压是否对称。

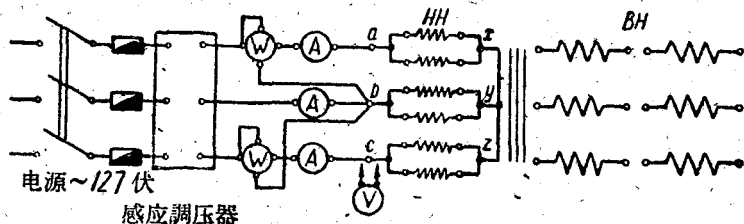


图 2.

记录试验数据并建议填入表 2 形式的表格。

在测量过程中,如果发现变压器的线电压 U_{ab} , U_{bc} 及 U_{ca} 实际上相等,为了节省时间,可以只测量其中的一个电压。如果稍有不对称,应该以三个线电压的算术平均值 U_{1cp} 作为电压 U_{10} 。

表 2. 空载特性

序 号	电 压				电 流				功 率			$\cos\varphi_x$	注
	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_{1cp}	I_a	I_b	I_c	I_{xcp}	P'_x	P''_x	P_x		
	θ	θ	θ	θ	a	a	a	a	格数	格数	瓦		
1													$c_{em} = \bar{W}/0$
2													
3													
4													
5													
6													

c_{em} ——瓦特计刻度的分度数值

现代三相变压器的磁路系统是不对称的,因此,中间一相的激磁功率较旁边二相为小,相应的中间一相的空载电流也较小。所以空载电流应该三相分别测量再根据测量数据确定算术平均值 I_{xcp0} 。

测量功率 P_x 时, 应该检验测量仪表的功率损耗。如果这损耗超过被测数值的 1%, 那末所测得的 P_x 应该加以校正*。

空载时的功率因数可以按下式计算:

$$\text{对三相变压器 } \cos\varphi_x = \frac{P_x}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_x},$$

$$\text{对单相变压器 } \cos\varphi_x = \frac{P_x}{U_1 \cdot I_x}.$$

根据表 2 的数据: U_{10p} ; I_{x0p} ; P_x 及 $\cos\varphi_x$ 可以作出变压器的空载特性:

$$I_x = f(U_1); P_x = f(U_1) \text{ 及 } \cos\varphi_x = f(U_1).$$

这些特性的大致形状如图 3 所示。

根据空载特性可以确定额定电压 U_{1n} 时的 I_x , P_x 及 $\cos\varphi_x$ 。按试验数据也可确定空载电流的有功和无功分量:

$$I_a = I_x \cos\varphi_x; I_p = I_x \sin\varphi_x.$$

通常 $I_a < I_p$

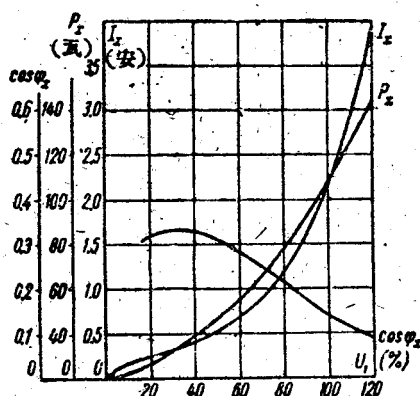


图 3.

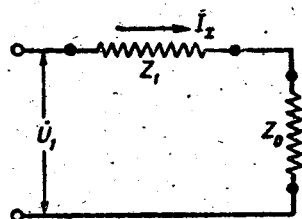


图 4.

* 按图 2 接线时, 仪表中的功率损耗可以不計。

I_x, I_a, I_p 應該用額定電流 I_n 的百分數來表示。額定電壓時的空載電流通常為額定電流的 10—12 到 3—4%。大的數值對應於容量為 1—10 千伏安的變壓器。隨著變壓器容量的增長，空載電流的相對數值逐漸減小。

圖 4 為變壓器空載運行時的單相等值線路。按此線路根據空載試驗數據可確定每相：

$$Z_x = |Z_0 + Z_1| = \frac{U_{1\phi}}{I_{x\phi}};$$

$$r_x = r_0 + r_1 = \frac{P_{x\phi}}{I_{x\phi}^2};$$

$$x_x = x_0 + x_1 = \sqrt{Z_x^2 - r_x^2};$$

式中 $U_{1\phi}$; $I_{x\phi}$ 及 $P_{x\phi}$ —— 每相電壓，電流及功率。對於原邊接成星形的三相變壓器：

$$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}; \quad I_{x\phi} = I_x; \quad P_{x\phi} = \frac{P_x}{3}.$$

應該指出，由於電壓 U_1 與空載電流 I_x 之間的非線性關係， Z_0 ， r_0 及 x_0 對該變壓器並非常數，而隨電壓 U_1 變化。

實際上，通常總是計算額定電壓 U_{1n} 時的那些數值。

繞組中的銅耗，以及漏磁通在繞組中及結構零件（夾件，箱壁等）中所引起的附加損耗與電流的平方成正比。因為在空載時變壓器原繞組中的電流很小（ $I_x = 0.1 - 0.03 I_n$ ），而副繞組中的電流為零，所以忽略這些損耗也不會引起很大誤差，亦即認為變壓器空載時全部測量的損耗都是鐵心中的鐵耗。因而可認為：

$$r_x = r_1 + r_0 \approx r_0 \quad \text{及} \quad r_0 \approx \frac{P_{x\phi}}{I_{x\phi}^2}.$$

空載時原邊繞組的電抗压降 $I_x x_1$ 與 $I_x x_0$ 相比極為微小，因此可忽略。据此可認為

$$x_x = x_1 + x_0 \approx x_0.$$

由上述假设可足够准确地认为:

$$z_0 \approx \frac{U_{1\phi}}{I_{\phi}}$$

铁心中的铁耗约与磁感应的平方成正比, 而磁感应也正比于其感应电势。后者当变压器从空载到满载的范围内都与外施电压差别不大。因此, 铁耗实际上正比于电压的平方。所以当空载及 $U_1 = U_{1n}$ 时, 变压器中的损耗实际上与负载时的铁耗没有什么差别。

铁心柱中的磁感应 B_c 可从下式求得: $E = 4.44 \cdot f \cdot w \cdot B_c \cdot S_c \cdot 10^{-8}$ (伏), 式中: f —频率(赫芝); w —绕组的匝数; S_c —铁心柱截面(公分²)。假定 $E_1 \approx U_1$, 得:

$$B_c = \frac{U_1 \cdot 10^8}{4.44 \cdot f \cdot w \cdot S_c} \text{ (高斯)}.$$

对于被研究的变压器 $S_c = 52.5$ 公分² (绕组的匝数 w 见绪论)。

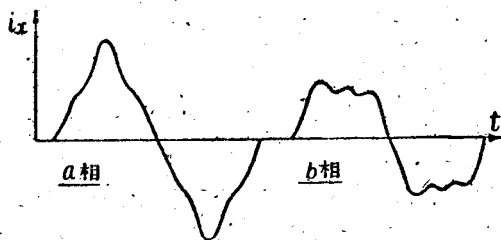


图 5.

铁耗与外施电压的波形及频率有关。用示波器可以检验电压的确切波形, 而用频率计可以检验频率。

空载电流与原边端电压成非线性关系。因而当电压随时间成正弦变化时, 空载电流并非正弦。铁心柱中的磁感应愈大, 则空载电流的波形 $i_x = f(t)$ 与正弦形的差别亦愈大。曲线的大致形状如图 5 所示。

为了记录空载电流的波形, 可以采用电子示波器, 示波器按图