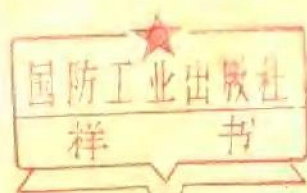


小功率电讯变压器 的设计与制造

秦裕发 编



国防工业出版社

内 容 简 介

本书详细地分析了各种变压器的特点和参数计算；以实例说明各种变压器的设计步骤和方法；结合工厂实际，介绍了变压器制造过程和典型工艺、使用的材料和测量方法等内容。

本书主要供从事有关专业的工人、工程技术人员和业余爱好者阅读和参考。

小功率电讯变压器的设计与制造

秦 裕 发 编

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 6¹⁸/₁₆ 172千字

1983年8月第一版 1983年8月第一次印刷 印数：00,001—15,500册

统一书号：15034·2519 定价：0.87元

前 言

本书原是为工厂业余教学需要而编写的教材。后来，在使用过程中，不少单位和个人前来索取，供不应求。为了适应我国电子工业的发展，满足广大读者的需要，本书是在原教材基础上进行了适当的修改而编写成的。

本书在编写过程中，力求以通俗的语言阐明基本原理。全书分六章。第一章，绪论，简单介绍变压器在无线电通讯中的作用、分类和发展方向。第二章，理论基础，从电和磁两方面阐明变压器的工作原理。第三章，电源变压器设计，主要叙述电源变压器的各种参数及其要求，举例说明设计步骤和方法。第四章，音频变压器设计，从无线电线路的角度分析音频变压器的作用和要求，详细分析了音频变压器的参数和计算，举例说明了音频变压器的设计步骤和方法。同时，还专题分析了晶体管音频变压器设计特点，举例说明设计步骤和方法。第五章，变压器材料，详细介绍了我国生产的变压器绝缘材料、铁心材料和导线材料的性能和要求。第六章，变压器制造和测量，结合工厂实际，介绍了变压器制造流程、典型工艺、测量设备和测量方法。最后是附录，收集了我国生产的电工硅钢板、铁心标准、电磁线标准和各种特性曲线，供计算时参考使用。

在本书的编写过程中，唐开兰和徐国宝两同志均对本书提出过宝贵意见，借此机会向他们表示衷心感谢。由于编者水平有限，书中内容虽经反复推敲，也难免还有不妥之处，望读者批评指正。

编者 秦裕发

目 录

常用符号	1
第一章 绪论	3
第一节 变压器的作用及其分类	3
第二节 变压器的结构	5
第三节 变压器的发展方向	8
第二章 变压器的理论基础	9
第一节 变压器的工作原理	9
第二节 变压器空载运行	10
第三节 变压器负载运行	26
第四节 磁路基础	33
第三章 电源变压器设计	47
第一节 电源变压器参数	47
第二节 电源变压器结构计算	55
第三节 高频电源变压器	82
第四节 自耦变压器	89
第四章 音频变压器设计	95
第一节 音频变压器特点和要求	95
第二节 音频变压器基本特性	96
第三节 音频变压器计算	102
第四节 晶体管音频变压器设计	121
第五章 变压器材料	131
第一节 铁心材料	131
第二节 导线材料	134
第三节 绝缘材料	139
第六章 变压器制造与测量	150
第一节 变压器线包制造	151

第二节 变压器铁心制造	156
第三节 浸渍与密封	166
第四节 变压器装配	172
第五节 变压器测量	175
附录	181
一、电工用硅钢板标准	181
二、铁镍软磁合金（部分）标准	184
三、铁心标准	185
四、线径标准	198
五、变压器各种特性曲线	207

常用符号

B_m	磁感应强度幅值
E_1, E_2	变压器初、次级绕组感应电势有效值
E_{s1}, E_{s2}	变压器初、次级绕组漏电势有效值
F_c	变压器铁心散热面积
f_l	最低频率
f_h	最高频率
F_m	变压器线包散热面积
$H_{\sim}$	变压器磁场强度
H_{dc}	变压器直流磁化力
I_0	变压器空载电流
I_c	变压器铁心损耗电流
I_{μ}	变压器铁心磁化电流
j	变压器绕组导线的电流密度
k_c	变压器铁心占孔系数
k_m	变压器窗口中铜的占孔系数
l_c	变压器铁心平均磁路长度
l_g	非磁性气隙平均长度
L_1	变压器初级线圈电感
L_r	变压器漏感
M_l	变压器低频频率失真系数
M_h	变压器高频频率失真系数
P_1	输入功率
P_2	输出功率
P_{σ}	变压器铁耗

P_M	变压器铜耗
P_T	变压器功率
P_V	变压器单位重量铁心损耗功率
P_{V0}	变压器空载时单位重量铁心损耗功率
r_1	变压器初级绕组电阻
r_2	变压器次级绕组电阻
R_a	电子管或晶体管最佳负载电阻
R_e	电源等效电阻
R_i	电子管内阻 (讯号源内阻)
R_M	变压器磁阻
s_0	变压器铁心窗口面积
s_2	非磁性气隙的截面积
s_c	变压器铁心中心柱横截面积
s_m	变压器铁心窗口中铜的截面积
s_{m1}	变压器铁心窗口中初级绕组所占的截面积
s_{m2}	变压器铁心窗口中次级绕组所占的截面积
w	变压器绕组的圈数
α	变压器散热系数
η_1	变压器初级线圈时间常数
η_2	变压器次级线圈时间常数
μ_0	变压器起始导磁系数
μ_{e0}	变压器等效起始导磁系数
$\mu_{\max}$	变压器最大导磁系数
Φ	磁通

第一章 绪 论

第一节 变压器的作用及其分类

在各种电子产品中，变压器的品种繁多，用途很广。如在交流供电系统中，无线电设备所需要的不同数值电压，就是通过变压器变换而获得的。为了要得到波纹系数较小的直流电，还得使用阻流圈进行滤波。在使用电子管的电路中，由于灯丝电压较市电低，灯丝的加热也要由灯丝变压器降压后供电。

在音频放大器中，音频信号电压的改变、功率的传递、阻抗匹配等，都要有相应的变压器配合工作。所以在无线电通讯设备中，变压器通常是不可缺少的组件之一。

根据变压器的作用可以分为如下几类。

一、电源变压器

在无线电设备中，供给各个电子管或晶体管工作电压的叫电源变压器。按照它不同的性质和工作情况，又可分为下列几种。

1. 灯丝变压器

灯丝变压器是用来加热电子管灯丝。因为一般电子管的灯丝额定电压都很低（如 5 伏，6.3 伏，12.5 伏等等），所以这种变压器总是降压的。为了保证电子管的正常工作，电子管灯丝供电电压不能偏离其额定电压太远（常小于 5%）。供电电压过高，会影响电子管使用寿命。供电电压过低，灯丝加热功率不足，阴极温度下降，影响管子工作的稳定性，严重的话还可能损坏管子。因此，要求灯丝变压器的输出电压应比较准确。

2. 整流变压器

无线电路路需要的各种不同数值的直流电压，是通过整流器

将交流电经过整流而获得的，而整流变压器就是供给整流器所需要的各种数值的交流电压，以满足线路的要求。

由于整流方式和滤波形式不一样，也就是说，整流器的负载性质随着整流方式（半波、全波、桥式或倍压）及滤波形式（感性输入或容性输入）变化而变化，所以整流变压器的设计就要根据负载的性质进行。

3. 灯丝整流联合变压器

在小功率的电子线路中，为了缩小体积，减少品种，往往采用灯丝和整流联合变压器，即它们的初级是共同的。这种变压器的初级绕组的导线和铁心虽然较单独一个变压器（灯丝或整流变压器）多一些，但总的材料消耗是少得多，总体积也小，加工时间也节省，总的成本是低的。

4. 多相变压器

大功率的无线电通讯设备电源变压器，往往采用三相电源变压器。一方面，三相整流桥的纹波电压较单相小得多，大大缩小滤波器的体积；另一方面，市电是三相供电，不仅用电方便，也能使电网三相负载均衡，大大缩小电网变压器的体积。

5. 高频变压器

一般无线电通讯设备都采用市电供电，在我国其频率多数为50赫。但航空用或携带式的通讯设备，为了减轻重量，缩小体积，采用较高的频率，如400赫、800赫，或更高的频率以满足飞机对变压器体积和重量的要求。

二、音频变压器

此类变压器因其工作频率在音频范围（20~20000赫）内，所以称之为音频变压器。

在低频放大器中，音频变压器是用来变换音频信号，或变换阻抗。根据它在线路中的位置和作用的不同，可分为下列几种。

1. 输入变压器

输入变压器是用来耦合信号源和放大器输入级，它起电压变

换或阻抗匹配的作用。对这种变压器的要求是：一定的阻抗，一定的频响和良好的屏蔽。

2. 级间变压器

级间变压器是用来耦合前一级的输出级和下一级的输入级。这类变压器作电压的变换或阻抗的匹配，不传递功率，它也和输入变压器一样，要求一定的阻抗、一定的频响和良好的屏蔽。

3. 推动变压器

推动变压器是耦合推动级的屏级与乙类强放管的栅极间的变压器。其目的是使强放管的栅极有较大的推动功率，这类变压器要求有一定的变比和频率响应，而且还有功率的要求。

4. 输出变压器

输出变压器是放大器的输出级和负载之间的耦合元件，初级接功放级的输出级，次级接各种类型的负载。对这类变压器的要求是：一定的频响，一定的阻抗和最低的非线性失真。

三、阻流圈

交流电压经过整流变成了单向的脉动电流。应用傅里叶变换将其分解，可以看出它含有大量的高次谐波，也就是说整流后获得的脉动电流中还含有大量的交流成分。为满足线路的要求，还必须进行滤波，使交流成分减少，直流平正。滤波的型式较多，其中阻流圈和电容器组成的 π 型和T型滤波器是经常使用的滤波型式。

对阻流圈的要求：电感量大，直流电阻小，重量轻，体积小。

第二节 变压器的结构

在无线电设备中，虽然各种类别的变压器作用不一样，性质也不相同，但它们的结构形式是大同小异。变压器主要由线包、铁心和结构件组成（见图 1-1）。

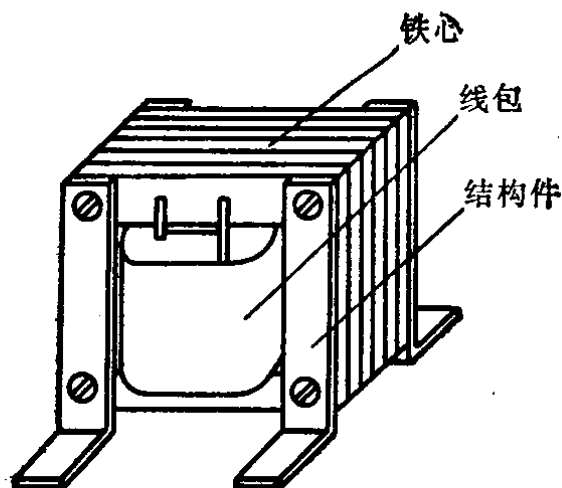


图1-1 变压器的结构

一、线包

所谓线包就是在底筒上或骨架上绕上初级和次级绕组，每个绕组的层间一般均要垫层间绝缘，绕组间也要裹上绝缘层。

线包是变压器的主要组成部分之一，变压器的参数决定了它的结构和形式。例如电压的高低、电感量的大小、漏感、分布电容、频响和效率等等。

二、铁心

采用铁心的目的是增加初次级互感，低频时铁心通常采用硅钢片或其它高导磁的合金钢片叠成或者卷绕而成。为了减少涡流损耗，硅钢片间要有一定程度的绝缘，为此，硅钢片表面要经过适当处理。高周率的电源变压器铁心要用较薄的硅钢片[●]。铁心的形式一般分下面几种：

1. 片状铁心

片状铁心又分壳式铁心和心式铁心两种（见图 1-2、图 1-3）。后者是将硅钢片冲成 Π 形或 $\sqcap$ 形，叠成 $\square$ 或 $\square$ 形。这两种铁心各有优点。壳式铁心，只需一只线包，加工方便。心式铁心需要两只线包，但省铜、耗电小（绕组分二半，绕组厚度小，平均匝长短）、

● 在频率较高的时候，为了减少涡流损耗，也经常采用铁氧体作铁心。限于篇幅，本书没有讨论它。

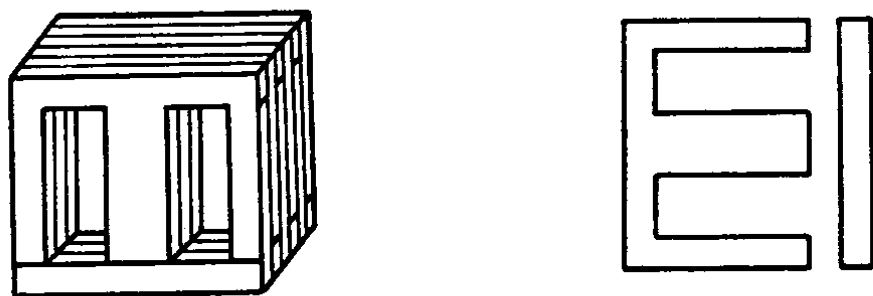


图1-2 壳式铁心

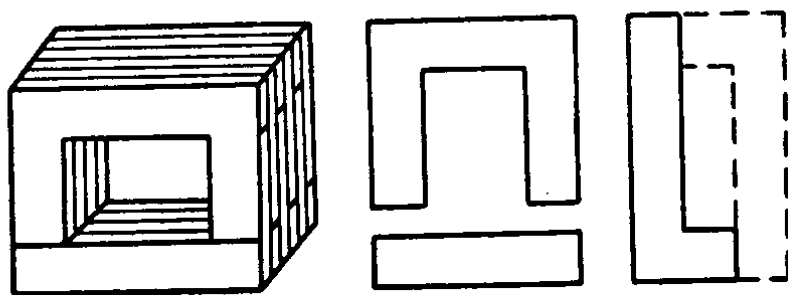


图1-3 心式铁心

漏感小、散热条件好、受外界杂散磁场的干扰小（因两线包感应的电势方向相反而抵消）。叠片的方法有两种，即交叠法和对接法。交叠法是把III形或II形交替地插入，端片也分别上下二面插入，这种叠法的优点是铁心容易夹紧，磁路空隙小，但装配麻烦，一般都以2~3片交替插入。对接法的磁路有接口气隙，磁阻较大，铁心损耗较大；但在直流磁化的低频变压器或阻流圈中，为了限制直流磁化的作用，还必须引用非磁性气隙，对接法便于调节气隙，很方便。

2. C型铁心

硅钢片有纹向和非纹向之别[●]，顺纹向方向损耗小，非纹向方向损耗大，而C型铁心就是利用顺纹向方向损耗小的特点，使硅钢片按照顺纹向方向下料，在专用设备上由下成的带料卷绕成铁心。这种铁心的使用方法与片状铁心相同。

● 硅钢片钢板轧制时，顺轧制方向有纹向，称之纹向，非轧制方向无纹向，称之非纹向。

三、结构件与密封件

变压器除了铁心和线包外，还有其它零件，如紧固件、底座、支架、钢带等等。密封件有外壳、密封零件等。至于采用怎样的结构件，需要不需要密封，这要根据变压器的性能和要求而定，后面将详细介绍。

第三节 变压器的发展方向

众所周知，变压器在无线电通讯机中，不论是重量还是体积都占有相当大的比例。随着电子工业的飞跃发展，尤其在航空及宇宙飞船的通讯中，都希望通讯机有尽可能小的体积和轻的重量。目前，通讯机已开始使用集成电路、薄膜电路及微膜组件等，这样，要减小通讯机的体积和重量，矛盾更集中于变压器上了。

鉴于上述情况，我国有关单位已开始对电源变压器进行缩小体积、减轻重量的探讨，并作了大量的研制工作。普遍认为，要使电源变压器缩小体积、减轻重量，除了合理的选择几何尺寸和电气参数外，还必须提高电源的频率和变压器的温度绝缘等级。可以认为，400~1500 赫或更高的频率，对缩小体积减轻重量是比较适当的，H或C级以上的温度等级也是可取的。要满足这些要求，铁心必须采用高磁通密度、低损耗的薄片（0.05 毫米以下）钢带。导线要采用耐高温的陶瓷漆包线。绝缘材料也希望在采用高温、高频、高压情况下抗电强度高、机械强度好、损耗小的合成树脂，或无机材料。可以深信，不久将来，小的、轻的电源变压器和音频变压器一定会问世。

第二章 变压器的理论基础

第一节 变压器的工作原理

分析变压器工作原理的基础是法拉第电磁感应定律。它的基本组成部分是一个铁心和两个绕在铁心上独立的初、次级线圈(见图 2-1)。AX 为初级线圈, 当其加有频率为 f 的正弦波交流电压 u_1 时 (以后凡是在符号右下角注“1”者为初级线圈, 注“2”者为次级线圈), 线圈的导线内就有电流流过。此电流在初级线圈中产生一定的磁势 F_1 , 这磁势在铁心中便产生了交连的交变磁通 φ_1 。由于磁通随时间而变, 并与初线圈交连, 在初级线圈两端产生感应电动势 e_1 。同时, 这交变磁通也与次级线圈交连, 使次级线圈也产生感应电动势 e_2 , 也就是次级的开路电压。如果这时, 在次级线圈两端接上负载, 则负载上就有电流流通。同时, 电流也流过次级线圈, 产生和初级方向相反的磁势 F_2 , 使铁心中的磁通发生变化。当变压器初级线圈的外加电压 u_1 不变时, 要使初级线圈产生的感应电动势 e_1 不变, 必须使产生 e_1 的铁心总磁通不变。

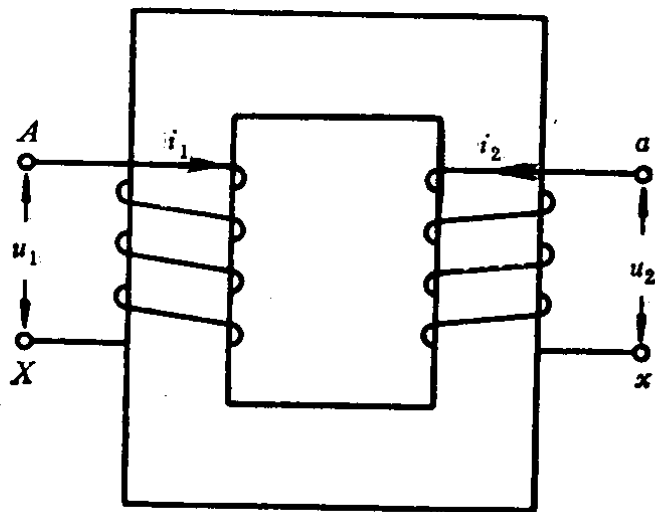


图2-1 变压器示意图

因此，必须使初级线圈流过的电流 i_1 增加。其增加电流所产生的磁势增量要刚好抵消次级线圈流过电流 i_2 所产生的磁势，结果铁心中总的磁通和次级线圈没有接上负载一样毫无变化。这部分内容，后面还将更进一步介绍。

从上面分析可以清楚地看到，当接上负载以后，次级线圈便有功率输出，负载便得到功率。同样初级线圈也相应增加了一定的功率，其增加的功率，在不考虑损耗情况下等于次级线圈输出功率，这是符合能量守恒定律的。同时也看出，变压器不仅可以改变电压的大小（这一点后面将加以介绍），同时还能传递功率。而初、次级中交变电压的频率是不会改变的。

第二节 变压器空载运行

一、感应电势

1. 初级线圈感应电势 E_1 分析

由楞次定律知道，感应电流的磁场总是阻碍原磁场的变化。设 E_1 在初级线圈中，因磁通 ϕ_1 而感应的电势从 A 到 X 为电势上升

$$e_1 = -w_1 \frac{d\phi_1}{dt} \times 10^{-8} \quad (2-1)$$

式中 e_1 —— E_1 的瞬时值；

ϕ_1 —— ϕ_1 的瞬时值。

上式右边有一个负号，其意义如下（见图 2-2）。

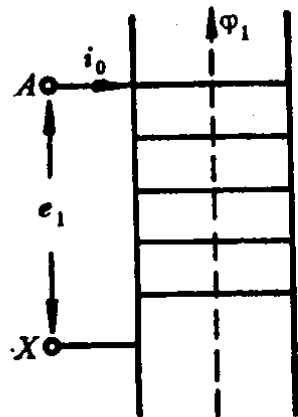


图2-2 i_0 、 ϕ_1 与 e_1 变化示意图

（1）当空载电流 i_0 为正值，且正在增加时，则磁通 ϕ_1 也在增加，此时 $d\phi_1/dt$ 为正值。按楞次定律，从 X 至 A 感应出正的电势上升。也可以说，从 A 至 X 感应出电势上升为负值。由式（2-1）得出

$$e_1 = -w_1 \frac{d\phi_1}{dt} \times 10^{-8} = \text{负值}$$

(2) 当空载电流 i_0 为正值, 且正在减小时, 磁通 φ_1 也在减小, 此时 $d\varphi_1/dt$ 为负值。按楞次定律, 从 A 至 X 感应出正的电势上升。由式 (2-1) 得出

$$e_1 = -w_1 \frac{d\varphi_1}{dt} \times 10^{-8} = \text{正值}$$

从上面分析可知, 空载电流 i_0 为正值时, 不论它是增加或是减小, 磁通 φ_1 也随着增加或减小, $d\varphi/dt$ 也随着变为正值或负值, 如果按式 (2-1) 计算, 只有在等号右边有一个负号, 才能使得出的结论符合楞次定律, 符合原来假设的 A 至 X 为电势上升的方向。

倘若前面假设 E_1 从 X 至 A 为电势上升方向, 则式 (2-1) 等号右边应除去负号才能使得出的结论符合楞次定律。

在上面的分析过程中, 略去了漏磁和变压器内阻所造成的压降, 因为空载时 E_{r1} 及 E_{r1} 远小于 E_1 (空载时 E_{r1} 约为 E_1 的 0.2%, E_{r1} 约为 E_1 的 0.1% 以下, 空载损耗相对来说也是不大)。在这基础上忽略这些量的变化, 对分析结果不会有太大影响, 但计算起来却简单多了。

我们假设, 一个没有漏磁、没有电阻和铁心损耗(简称铁耗)的变压器, 称之为理想变压器。其电压方程式如下

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$$

式中, $\dot{U}_1$ 和 $\dot{E}_1$ 在数值上大小相等, 相位上相差 180° , 因此, 通常称 $\dot{E}_1$ 为 $\dot{U}_1$ 的反电势。

又设 u_1 按正弦规律变化, 而且变压器工作在线性电路中, 则 e_1 也按正弦规律变化。从式 (2-1) 可知, 交变磁通 φ_1 也会按正弦的规律变化着。

$$\text{令} \quad \varphi_1 = \Phi_{1m} \cos \omega t \quad (2-2)$$

则由式 (2-1) 可得

因为

$$\begin{aligned} e_1 &= \omega w_1 \Phi_{1m} \sin \omega t \times 10^{-8} \\ &= E_{1m} \sin \omega t = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t \\ &= \sqrt{2} E_1 \cos(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (2-3)$$

所以
$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega w_1 \Phi_{1m} \times 10^{-8}$$

$$= 4.44 f w_1 B_m S_c \times 10^{-8} \quad (2-4)$$

式中 f ——电源频率 (赫);

E_1 ——电势的有效值 (伏);

B_m ——磁通密度幅值 (或称磁感应强度幅值) (高斯);

S_c ——变压器铁心中心柱截面积 (厘米²)。

从式 (2-2) 和式 (2-4) 可以得出如下结论:

(1) e_1 和 φ_1 近似于正弦波的变化, 相位上 e_1 落后于 $\varphi_1 90^\circ$;

(2) E_1 的数值可根据式 (2-4) 给出的数值计算。

φ_1 系 i_0 产生, 若不考虑磁性材料的非线性与铁损, 则 φ_1 和 i_0 成正比; φ_1 和 i_0 同相位, 故 E_1 落后于 $i_0 90^\circ$, 数值与 i_0 成正比。令比例常数为 x_m , 则

$$\dot{E}_1 = -j I_0 x_m \quad \text{或} \quad -\dot{E}_1 = j I_0 x_m \quad (2-5)$$

从式 (2-5) 中明显可见: x_m 只有阻抗量纲, 鉴于所考虑的变压器是理想的, 所以 x_m 就是一个纯电抗, 并称之为激磁电抗。它说明空载电流有效值 I_0 通过一个纯电感线圈时, 在线圈中激起的感应电动势 E_1 , 在相位上将落后于 $I_0 90^\circ$ 。在一般变压器中, x_m 就是表示初级线圈除掉漏磁通后的自感抗, 即代表因主磁通而引起的感抗。

$$\begin{aligned} x_m &= \frac{E_1}{I_0} = \frac{\omega w_1 \Phi_{1m}}{\sqrt{2} I_0} \times 10^{-8} \\ &= \omega \frac{w_1 \Phi_1}{I_0} \times 10^{-8} = \omega \frac{\Phi_1 w_2}{I_0} \\ &\quad \cdot \frac{w_1}{w_2} \times 10^{-8} = \omega M_{12} \frac{w_1}{w_2} \times 10^{-8} \end{aligned} \quad (2-6)$$