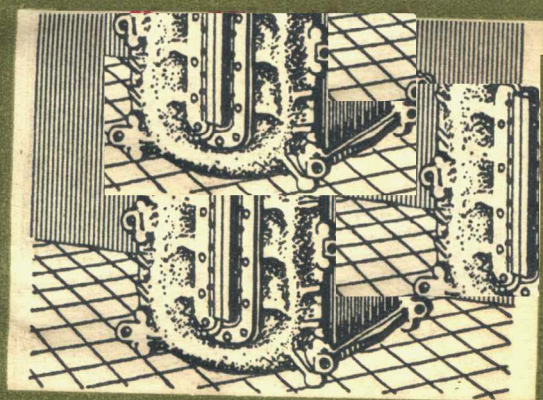




第 7 册

高频加热用变压器



科学技术出版社

高頻热处理叢書

第 7 册

高頻加热用变压器

[苏联] Bc. B. 沃洛格金著

何 毓 芝 譯

科学技術出版社

內 容 提 要

这本小册子简要地叙述用于高频加热的几种主要的变压器。書中还介绍每种变压器由于其用途、工作状态和工作条件而来的特征。本書并介绍高频变压器的近似计算方法。

这本小册子可供工业部門中从事高频电流加热工作的有关人員参考。

高频加热用变压器

ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРЕВА

原 著 者 [苏联] В. В. Вологдин

原出版者 Машгиз · 1954年版

譯 者 何毓芝 周維金

*

科学技術出版社出版

(上海南京西路2004号)

上海市書刊出版业营业許可証出079号

信誠印刷厂印刷 新華書店上海發行所总經售

*

統一書号: 15119 · 599

开本 787×1092 1/32 · 印張 1 7/16 · 字數 28,000

1957年12月第1版

1957年12月第1次印刷 · 印數 1—2,000

定价: (10) 0.22元

謹用我这本小小的著作來紀念
我的父親和老師瓦連琴·彼得羅維
奇·沃洛格金。

作者

原 序

用高頻電流感應加熱金屬的方法，是在列寧格勒 B. И. 烏里揚諾夫（列寧）電工學院中的 B. П. 沃洛格金教授的實驗室里發明的。後來，“B. П. 沃洛格金教授”高頻電流科學研究院（НИИ ТВЧ）將它廣泛地運用在工業方面。這種感應加熱的方法需要專用的高頻設備。

在大多數高頻加熱裝置中，都需要使電源（可能是機動發電機或電子管振盪器）的參數與負荷（帶有被加熱零件的感應器）的參數相匹配，因此須用變壓器。變壓器本身是一種電磁裝置，能將一定頻率和電壓的交變電流轉換成頻率相同而電壓不同的交變電流。

用途不同的高頻裝置由於工作條件不同，故所用的變壓器型式也不同。變壓器的型式和結構主要決定於高頻裝置的供電振盪器的電流頻率。

这本小冊子的任務是向讀者介紹幾種適用的高頻變壓器，其中特別着重介紹用於高頻裝置的鐵心變壓器。這種變壓器最初是在蘇聯用 B. П. 沃洛格金的感應加熱法，作鋼表面淬火的設備中廣泛應用，後來，才在國外被應用到同樣的用途方面。

鐵心變壓器完全可以由需用單位自己製造。工作於射頻的

裝置，則一般总是連同變壓器全套由製造工廠供應。

必須指出，現代高頻變壓器的創制成功，主要應該歸功于已故工程師 M. M. 維爾畢茨基的勞動。

書中的內容是向讀者初步介紹一般的電工知識和高頻技術知識；高頻技術方面的知識雖然在本叢書前几冊中也敘述過，但不妨再介紹一下。

目 录

原序

緒論	1
1. 高頻变压器	2
1-1. 变压器的用途	2
1-2. 变压器的工作	3
1-3. 綫圈的正确結構和尺寸的确定	5
1-4. 綫圈的結構形式	8
1-5. 磁导体	10
1-6. 空心变压器	18
2. 增高頻变压器的近似計算	21
2-1. 原始数据	22
2-2. 鉄心截面的形狀和尺寸的选定	22
2-3. 鉄心內的感应密度和損耗系数的求法	23
2-4. 鉄心的热力計算	24
2-5. 規定工作状态的計算	25
2-6. 軛鉄的計算	26
2-7. 变压器綫圈和絕緣套的計算	27
2-8. 磁导体的尺寸	32
2-9. 磁导体的重量和鉄損	33
2-10. 变压器的电压、功率和效率的計算	34
2-11. 磁导体冷却系統的計算	36
2-12. 綫圈冷却系統的計算	38

緒 論

声頻變壓器和工頻(50周)變壓器一樣，它的結構主要是由彼此毫無電接觸的兩個線圈和磁路組成的。

根據功用的不同，線圈分為初級線圈和次級線圈。初級線圈與電源相接，次級線圈與負荷相接。

變壓器有升壓變壓器和降壓變壓器之分。降壓變壓器的初級線圈匝數比次級線圈匝數多。來自電源的交變電流，通過初級線圈而在每匝和整個線圈的周圍造成交變磁通。

交變磁通截割次級線圈，而在其中感應出電動勢來。

當次級線圈接上負荷時，電路中就有電流。此電流在次級線圈和鄰近的初級線圈周圍形成交變磁通，其方向和大小都與初級線圈電流所造成的磁通不同。

這兩個磁通相互作用的結果形成一個合成磁通。

但是只有一部分合成磁通能完全環繞兩個線圈，成為變壓器的主磁通，在兩個線圈中感應出主電動勢。其餘部分的合成磁通中的其餘部分一般總較小，只能環繞一個線圈或一個線圈的一部分。

這一部分磁通不會促使能量由初級線圈傳到次級線圈，故稱之為漏磁通。漏磁通甚至當變壓器接於無感負荷時也有一些感抗存在。

在製造變壓器時，主要應該注意減少它的漏磁通，以及怎樣能夠獲得最高的效率。

1. 高頻变压器

1-1. 变压器的用途

为了造成磁場，以便將所需的能量在規定的短時間內輸送給被加热零件，这就必須有足够的电流通过感应器。零件的几何尺寸、形狀以及所需的加热强度决定着感应器的結構、感应器与零件的相对位置、电流的頻率、所采用的加热方法和完成該項加热过程所必需的功率^①。

在每种不同的加热情况下，加到感应器的电压都是有一定范围的：在 500 到 15,000 周的声頻范围内，感应器上每匝的电压一般为 15~100 伏；在 200,000~1,000,000 周内，每匝的电压为 50~400 伏^②。

功率为数十或数百千瓦的发电机，若設計成直接用作感应器的电源（即低压电源），是不适宜的。因为在低压时从发电机到負荷的饋电綫上的損耗很大；采用低压的电容器有很多的困难；且在低压时机动发电机和整个高頻裝置的效率也將很低。用于高頻設備的現代机动发电机的电压一般为 750~1,500 伏。射頻电子管振荡器的电压，由于电子管工作过程的特点，可达数千伏。

采用变压器作为中間环节，就可將发电机的高压变为感应器所需的低压。虽然在变压器內不免有若干損耗，但是如能遵

① 參閱 A. Д. 杰米切夫和 C. B. 沙施金著“高頻淬火”，本叢書第 3 册。

② 參閱 A. E. 斯魯霍茨基著“淬火感应器”，本叢書第 6 册。

循設計变压器的一定原則，就可使這項能量損耗減小到只占高頻裝置消耗總能量中的一小部分。

1-2. 变压器的工作

由于高频技术的特点，在感应加热設備內必須采用專用的高頻变压器。設計此种变压器时，应当考虑到由于高频电流的固有物理現象而产生的一些要求，以及变压器的工作条件。

我們知道，高频电流通过导体时并不是均匀分布在整個导体截面上。随着頻率的增高，电流就会由于所謂趋肤效应而趋向导体的表面层。

在卷成环狀或螺旋狀的導線內，高频电流不是均匀地分布在導線的表面层中，而是大部集中在环圈的內側。这种現象叫做綫圈效应。

如果高频电流沿两根彼此直接相鄰的導線流过，且电流的方向相反（例如在来回兩綫中往往如此），則導線內电流密度最大的部分是兩導線彼此相对的一側。这种現象叫做鄰近效应^①。

如果把一块金属放在高频磁場內，則金属內便产生感应电流，而使金属发热。磁性材料的这种发热現象尤其显著。

上述各种現象在高频变压器中也都存在。这些現象便决定着高频变压器的結構特征。高频变压器的特点就在于它的工作状态。

用同时加热法加热金属零件以进行淬火、钎焊及熔焊时，加热的時間是极短的，一般为4~10秒鐘。而冷却、取下零件和裝

① 关于趋肤效应、綫圈效应和鄰近效应的較詳細的說明，參閱 H. П. 格魯汉諾夫著“高频加热的物理基础”，本書第2册。

放新零件却要花費較多的時間。因此，變壓器承受負荷的時間僅為每個工作循環的一部分。

用連續加熱法加熱很大很重的零件時，一個工作循環中的工作時間部分增加了，但其中的非工作部分同時也延長，因為更換較大的零件所需的時間自然要比較多些。但自動淬火機例外，因為它可以不間斷地進行加熱。

這種在工作中插有或長或短停頓時間的周期性負荷稱為反復短時負荷。如果在停頓時間內，因結構的各部分損耗而產生的余熱，能由相當的冷卻系統完全冷卻，那末在上述這一類工作狀態下，變壓器可容許短時過負荷工作；但在連續工作的狀態下卻不容許。

用水冷卻時，磁導體能夠承受住短時間的過熱負荷，因此就有可能縮小磁導體的尺寸、節省材料、減少漏磁通，並提高變壓器的效率。

同時還須考慮變壓器的某些工作條件，這些條件雖然對變壓器的結構影響不大，但卻使對變壓器的要求愈加複雜化。這就是：變壓器周圍空氣的濕度，由於淬火用的水不斷蒸發而增加，水分可能間接地侵入變壓器，也可能由於冷卻系統損壞而直接流入變壓器。

在工作過程中，變壓器還可能受到機械力的作用。這種作用是由於淬火機上固定變壓器的那一部分有了移動，以及電動現象所引起的，後者當功率大、頻率較低時特別顯著。

變壓器一般是裝在淬火機上，因此可能還必須縮小它的尺寸和減輕重量。

變壓器的效率應尽可能提高。

計算證明，變壓器的效率降低 1%，就能引起相當大的電能

过耗，且与淬火设备的功率成比例地增加。例如功率为 100 千瓦的变压器，在全年 1/3 的工作时间中效率降低 1% 所过耗的电能约为 2,000 千瓦小时。

1-3. 线圈的正确结构和尺寸的确定

如果淬火设备的功率达数百千伏安，并且加到感应器上的电压很低，那末感应器内和感应器所接变压器次级线圈内的电流便可达到数千甚至数万安（表 1）。

表 1 当平均功率因数等于 0.3 时，不同功率的感应器上的电压与电流的关系

输入感应器的功率, 千瓦	25	50	75	100	200
当 $\cos \varphi_2 = 0.3$ 时, 输入感应器的功率, 千伏安	83	166	250	333	666
感应器上的电压, 伏	20	30	40	50	60
变压器次级线圈和感应器内的电流, 安	4,150	5,530	6,250	6,660	11,100

流经变压器线圈的高频电流在导线截面上的分布是不均匀的。大致可以认为，电流是沿导线的表面层流过，此表面层的厚度决定于电流的等效透入深度 Δ 。

电流在铜内的透入深度可按下式求得近似值：

$$\Delta = \frac{7}{\sqrt{f}} \text{ 公分}, \quad (1)$$

式中： f ——电流的频率，周。

初级线圈位于次级线圈之内，距离次级线圈很近。次级感应电流的方向恰与初级电流的方向相反。

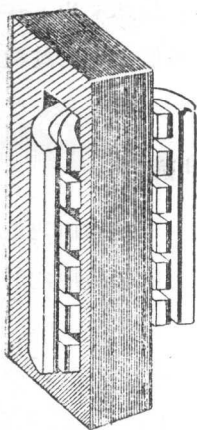


图 1. 高频变压器在工作状态下电流在綫圈内的分布情况。

由于鄰近效应以及鉄心能將初級电流排挤到綫圈的外側，所以流經初級綫圈和次級綫圈的电流，主要集中在兩綫圈上彼此相对的那一面(图 1)。導綫内有电流流过的这部分截面一般叫做有效截面。在这里它等于

$$S_a = H \cdot \Delta \text{ 公分}^2, \quad (2)$$

式中: H ——綫圈卷匝的寬度, 公分;
 Δ ——电流透入深度, 公分。

有效截面上电流密度是受綫圈内引起綫圈过热的損耗大小所限制的。高频变压器在水冷条件下, 綫圈每平方公里有效截面上的电流密度可容許不超过

100 安。

在电流密度較大的情况下工作是不允許的, 因为这样就很难使綫圈急速冷却, 特別是較長的初級綫圈。

高频变压器次級綫圈卷匝的最小寬度(表 2)可按以下的近似公式求出:

$$H_{2 \min} = \frac{I_2 \cdot \sqrt{f}}{7 \times 10,000} \text{ 公分}, \quad (3)$$

式中: I_2 ——次級綫圈内的电流, 安; f ——頻率, 周。

設計变压器时, 不宜以綫圈在最大容許电流密度工作为参考标准, 因为过大的銅損將严重影响效率值。最好是尽可能使变压器以比极限值小 $2/3 \sim 1/2$ 的电流密度工作, 为此須适当增加卷匝高度。增加的范围視感应器与变压器次級綫圈寬度之比而定。

表 2 变压器次级线圈匝数的最小宽度

輸入感应器的功率, 千瓦		25	50	75	100	200
变压器次级线圈内的电流, 安 (从表 1 中采用)		4,150	5,330	6,250	6,660	11,100
H_{2min} , 公分	频率为 2,500 周	3.07	4.13	4.66	4.97	8.28
	频率为 8,000 周	5.52	7.35	8.33	8.88	14.8

变压器次级线圈的宽度如果比感应器宽 3~4 倍, 那末就会使得次级线圈截面上的电流密度不均匀。

电流总是沿捷徑流通, 所以次级电流主要是分布在线圈的中部。此时, 边缘部分不仅沒有承受有效負荷, 却反而由于漏磁場感应出电流而产生額外損耗。

高频变压器因匝数很宽, 所以它的次级线圈通常只有一匝或至多两匝^①。因此, 当初级电压和次级电压 (U_1 和 U_2) 已确定时, 初级线圈的匝数也就可确定。

高频变压器初级线圈的匝数一般在 10 到 25 匝之間, 很少会超出这个范围。初级线圈繞成螺旋形, 并且通常是單层的。线圈的层数如加多时, 由于每一层匝数处于内部几层匝数的总电流所造成的磁場內, 因而线圈內的銅損大增。初级线圈的宽度应尽可能与次级线圈的

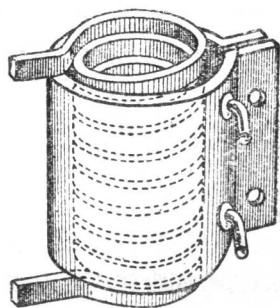


图 2. 变压器的初级线圈和次级线圈的相对位置。

① 在莫斯科斯大林汽車制造厂制造的某些变压器中, 可以見到次级线圈只有两匝的变压器。

寬度相等,因此時漏磁通最小(圖2)。初級繞圈是繞在鐵心,所以初級繞圈的直徑以及包于其外的次級繞圈的直徑,主要決于鐵心的尺寸。

1-4. 繞圈的結構形式

由于趨膚效應,初級繞圈的有效截面(電流流經的截面)緊貼導線表面的金屬層。因此,螺旋形的初級繞圈可用空心管來繞制,並利用管內孔道實施強烈的水冷卻。

管的截面應為扁方形,因為繞圈內的電流是沿卷匝面對次級繞圈的那一面流過。所以在卷匝寬度相等的情况下,扁形截面的銅管的有效截面比圓管的有效截面大(圖3)。扁方管可用直徑相當的標準無縫圓銅管壓制成。管壁的厚度應比取頻率的電流在銅內的透入深度約大50%。繞制初級繞圈的管上須用漆布交疊地繞上1~2層(圖4),以作卷匝與卷匝間絕緣。

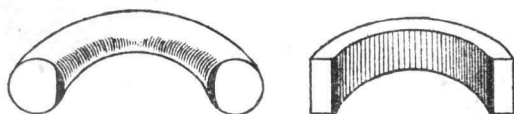


圖3. 卷匝寬度相等時,扁方形管的有效截面比圓管的大。

初級繞圈卷匝的最小寬度不僅應根據初級電流的容許密來選擇,同時還應考慮到使管內空腔應足夠通過冷卻用水。

從減少損耗的觀點上來說,最好盡量增大卷匝的寬度,但大的範圍還須取決于所需卷匝數、匝間的絕緣厚度、繞圈只能層繞制以及必須保持初次級繞圈寬度大致相等這一些因素。

次級繞圈最好是用厚3~4公厘的紅銅片制成,銅片卷成

狀。因為初級繞圈和次級繞圈內的
流密度大致相同，所以次級繞圈同
也須用水冷卻。

要使這繞圈冷卻，可以在圓筒外
面上一定位焊裝幾根扁方銅管
(圖 5a) 或一個水套 (如圖 5b) 以供
冷之用。

還有一個合適的辦法是把圓筒狀
次級繞圈做成可以拆開的兩半個，用螺栓扣緊在一起 (如圖
c)。在這兩個銅片制的半圓筒 (即次級繞圈) 的引出端上裝有
頭板，以供裝置感應器。

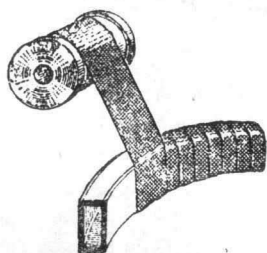


圖 4. 初級繞圈的卷匝用漆
布帶絕緣的情況。

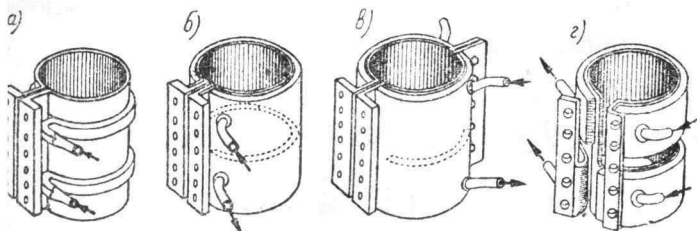


圖 5. 次級繞圈的結構。

a—焊有冷卻水管的、銅片制成的次級繞圈； b—裝有水套的、銅片
制成的次級繞圈； c—可拆式次級繞圈； d—雙匝式次級繞圈。

有時接頭板 (圖 6) 還同時利用來分配次級繞圈冷卻系統內
水，這樣還可順便冷卻接頭板本身，以防材料和固定螺栓過

初級繞圈位於次級繞圈內，並且同軸。次級繞圈比初級繞圈
夾一些，使初級繞圈引出線的方向可以垂直於變壓器的軸線。
及繞圈的引出端經過次級繞圈兩端外側引出，二者之間填有

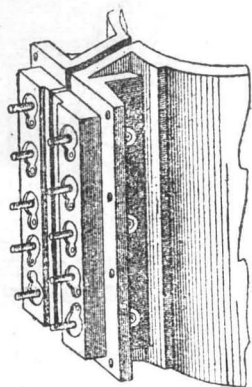


图 6. 高频变压器的接头板。

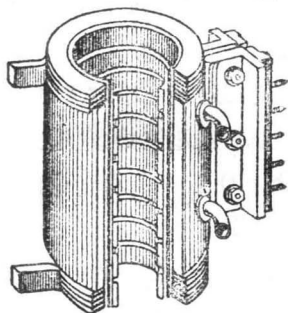


图 7. 初级线圈和次级线圈的相互位置。绝缘套和绝缘垫圈。

相当厚的绝缘垫圈（一般为纸板制成），垫圈的厚度应足够防止绝缘被击穿。

整个初级线圈用特制的绝缘套，与次级线圈和铁心完全绝缘。绝缘套厚约 3~6 公厘，是用纸板胶合成的（图 7）。

1-5. 磁导体

频率为 500~10,000 周的增高频率变压器与一般的电力变压器一样，最好是制成铁心式的，也就是用铁磁导体的。

射频变压器内虽然也适用铁心，但目前工业上不生产合乎这种需要的铁磁性材料。

交变磁场内的铁心会由于反复磁化所产生的损耗和内部产生的感应电流而剧烈发热；同时，当选用一般通用厚薄的铜片时，单位体积中耗散的功率在音频范围内大致是与频率的平方成比例地增加。铜片减薄，铁损即随之减小，但含矽百分率较高的特种变压器钢是很脆的，若继续减薄铜片，在生产上必然有很

大困难。

上述这些情况目前就限制了可以采用铁磁导体的频率范围。现在工业上已开始制造厚 0.68~0.08 公厘的冷轧变压器钢片 (牌号 XBП)。

如果变压器内磁通的方向与钢片平面方向不一致,则在高频率时,即使在极薄的钢片内,也能感应出相当大的电流,所以最好是用很细的钢丝来代替钢片。但是制造这种钢丝也很困难,因为矽钢很脆。在高频率时以采用粉末状强磁性材料压制成的铁心为最适宜。

为了减小漏磁通,增高频率变压器的磁导体一般是制成所谓“壳式”(图 8a)。在这种变压器中,绕在铁心上的线圈局部地被轭铁^①包住。采用“芯式”磁导体(图 8б)可以略微减小变压器的外廓尺寸和重量,提高一些效率;但若要把次级线圈分布在左右两条铁心上,则线圈引出端的结构以及制造方法都将很复杂。因此,这种变压器在高频技术中实际上几乎并不采用。

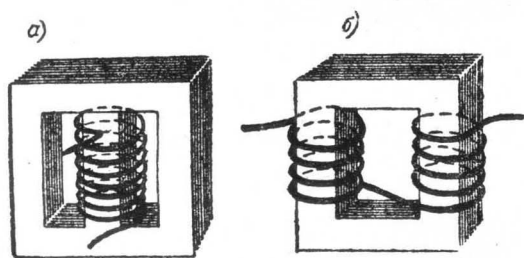


图 8. 变压器的磁导体。

a—壳式; б—芯式。

① 轭铁是指位于线圈外部使铁心的磁路成闭合回路的磁导体部分。