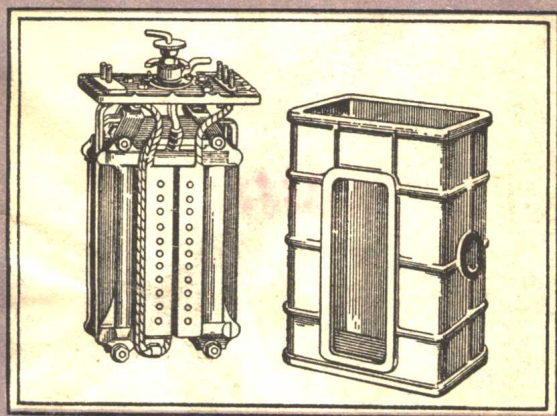




第 7 册

高频加热用变压器

〔苏联〕BC. B. 伏洛格金 A. E. 斯鲁霍茨基 著



上海科学技术出版社

635
37-7
1

高频热处理丛书

第 7 册

高频加热用变压器

〔苏联〕BC. B. 伏洛格金 A. E. 斯魯霍茨基 著

小 冰 译

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本丛书原版第一版于 1954 年出版，曾由本社翻譯出版。1957 年原书有了第二版，內容有相当大的修改，若干册书名亦有更改，为此根据新版本重譯重排，陸續出版。

本书为高频热处理丛书的第 7 册，专门叙述高频加热用铁芯磁路变压器、盘形线圈变压器、空心变压器及自耦变压器等的结构元件和近似计算，也引述了倍频器的线路和原理，可供广大高频热处理工人和技术人员阅读参考。

ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРЕВА

В. С. Вологдин

А. Е. Слухоцкий

Машгиз • 1957 年第二版

高频热处理丛书

第 7 册

高频加热用变压器

小 冰 譯

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

上海市印刷三厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印张 2 26/32 排版字数 61,000

1962 年 10 月第 1 版 1965 年 10 月第 2 次印刷

印数 2,201—6,900

统一书号 15119 · 1686 定价(科四) 0.32 元

目 录

緒論	1
第一章 变压器和倍頻器概述	4
1. 变压器在感应装置中的工作	4
2. 倍頻器的工作	7
3. 增高頻变压器和倍頻器的磁导体	11
4. 变压器和倍頻器的綫圈	27
第二章 感应加热用变压器类型	38
5. 变压器类型的选择	38
6. 增高頻壳式变压器	42
7. 盘形綫圈变压器	44
8. 芯式变压器	45
9. 自耦变压器	47
10. 增高頻氧磁体鉄芯变压器	49
11. 增高頻环形磁路变压器	49
12. 功率 100 千瓦頻率自 2500 至 7500 赫芝的頻率三倍器	51
13. 空心变压器	53
第三章 增高頻变压器近似計算	58
14. 計算的原始数据	58
15. 鉄芯截面尺寸的計算	59
16. 鉄芯的热力計算和軋鉄的計算	61
17. 变压器綫圈的計算	66
18. 磁路的尺寸、重量及鉄損	71
19. 电压的計算, 变压器的功率和效率	73
20. 磁路冷却系統的計算	75

21. 綫圈冷却系統的計算.....	77
第四章 空心变压器的电量近似計算.....	80
22. 計算的原始数据.....	81
23. 变压器結構元件的初步計算.....	81
24. 空心变压器綫圈的电参数及其在工作状态下的数据.....	82
参考文献.....	87

緒 論

产生磁場的加热零件就置于其內的感应器，供給感应器电流的高頻或增高頻发生器，使发生器参数与感应器参数相匹配的电容器組和变压器，紧固零件、感应器、变压器及一些輔助設備(包括接触器、继电器、檢查和控制加热过程的測量仪表等)用的机床或装置，都是利用高頻交变磁場的能量对某种金属零件进行淬火、鍛造、釐焊、焊接、堆焊的感应加热装置中不可缺少的元件(图1)。

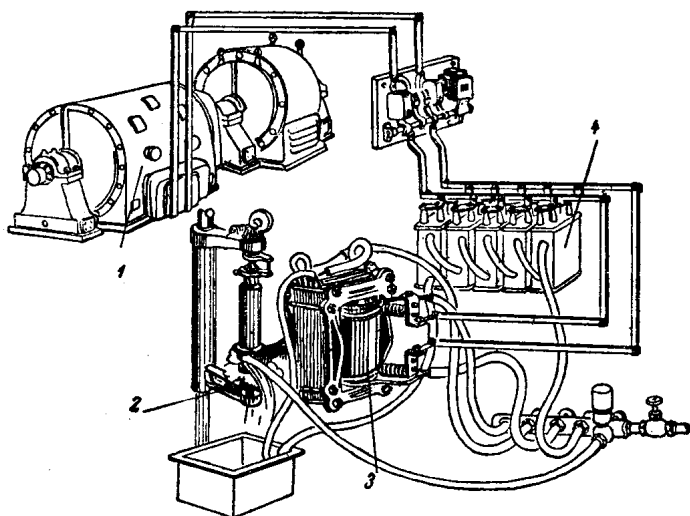


图1 感应加热装置

1—机械式发电机；2—感应器；3—变压器；4—电容器組

为了将所需的能量在很短的給定時間內輸給置于感应器

場內的加熱零件，必須有足夠的電流通過感應器。零件的幾何尺寸和形狀、所需的加熱速度和透熱層深度，決定着感應器的結構、感應器與零件的相互位置、電流頻率、加熱方法（同時加熱抑或順序連續加熱）以及所需的功率^①。

加到感應器上的電壓，取決於過程的物理現象及所採用的加熱工藝，也就是在每種具體情況下電壓的大小有一定的範圍（這範圍一般都不大）。在 500~15000 赫芝的聲頻範圍內，感應器上每匝的電壓約為 15~100 伏。在 200000~1000000 赫芝的射頻範圍內，感應器上每匝的電壓為 50~400 伏^②。

現代機械式高頻發電機的電壓一般為 375~1500 伏。射頻電子管振盪器的電壓，由於電子管工作過程的特點，可達數千伏。

功率為數十或數百千瓦的機械式高頻發電機，若設計成直接用作感應器的電源（即低壓電源）是不合理的。此外，在低壓時從發生器傳遞能量到負荷用的導線上的損耗很大，採用低壓的電容器組由於笨重昂貴而不適宜，並且低壓時機械式發電機和整個高頻裝置的效率將很低。

在利用集中供電的裝置中，各個加熱部位的參數相差可能很大，所以這些缺點就特別明顯。

採用變壓器作為中間環節，就可將發生器的高壓變為感應器所需的低壓。此時，在變壓器內不免有若干能量損失，但是如能遵循變壓器設計和製造的一定原則，就可使這項能量損失減小到只占高頻裝置所用總能量的微小部分。

① 參看 A. Д. 杰米切夫和 C. B. 沙施金著的“高頻淬火”，本叢書第 3 冊；

② 參看 A. E. 斯魯霍茨基著的“淬火感應器”，本叢書第 6 冊。

有一些感应装置,也可不装变压器,例如熔炼金属用的感应炉和鋼坯鍛压前加热用的装置。在这些装置中,感应器有很多匝圈。这种感应器上的电压足够大,因而发生器所发出的电流,可直接輸給感应器。

目前,特別在大型鍛造車間,对感应加热部位采取集中供給高頻电流的方法感到很大兴趣。

在这种情况下,用于加热直徑超过 30 毫米的毛坯的发生器,大部分具有較低的頻率(2500 赫芝或更低),而小部分用于加热較小直徑毛坯的发生器,具有較高的頻率(8000~10000 赫芝)。

装备了两組发生器,照管起来就复杂,需要两套汇流系統,并降低了整个系統在負荷分配方面的机动性。后者还促使发生器的利用率减小,从而导致平均效率降低。

在此情况下最好采用靜电磁倍頻器,它的外形尺寸很小,能装在相应加热部位的里面。

包括一次电路电容器組的损失在內,倍頻器的效率为 80~85%,所以完全适合于在类似系統中使用,因为頻率在 8000~10000 赫芝时,发生器和汇流条的效率要比頻率在 2500 赫芝时低,而采用两組发生器的利用率和平均效率要比采用一組发生器时低。

如果按較低頻率所需的功率应超过按較高頻率所需的功率 4 倍以上,則采用倍頻器最为合适。

在单独供电的高頻装置中,利用倍頻器有时也很适宜。例如,頻率 2500 赫芝的发生器在加热直徑超过 30 毫米的零件时,可保証相当高的效率,而这种发生器在配备三倍頻率的倍頻器后可保証处理直徑 15~20 毫米的零件。同时應該指出,由于需要非正弦电流的倍頻器,发生器可以采用 70~80%

的額定功率。

目前，B. II. 伏洛格金教授命名的高頻电流科学研究所已設計成功率 100 千瓦、頻率由 2500 至 7500 赫芝的倍頻器，經過長期試驗，証明完全有效。下面將闡明這種倍頻器的構造及其工作原理。

倍頻器的計算很複雜，所以在此不作介紹。

第一章 變壓器和倍頻器概述

1. 變壓器在感應裝置中的工作

聲頻變壓器與電流頻率 50 赫芝的變壓器一樣，結構的主要部分是在電氣上彼此無關的兩個線圈和一個磁路。線圈分為初級線圈和次級線圈。初級線圈與電源相連，次級線圈與負荷相連。

如果需要降低電源的電壓，初級線圈的匝數應比次級線圈的匝數多，反之則少。

來自電源的交流電，通過初級線圈導線的各匝，在線圈周圍產生閉合的交變磁通。當此磁通截割次級線圈，便在其匝圈內感應出電動勢。

將次級線圈接上負荷，電路中就有電流。此電流在次級線圈以及與之鄰近的初級線圈的周圍形成交變磁通，其方向和大小都與初級線圈的電流所造成的磁通不同。兩個磁通相互作用，便產生合成磁通，這就叫做變壓器的主磁通，並在兩個線圈內感應出主電動勢。

但是，只有一部分合成磁通能完全環繞兩個線圈。其餘的磁通（一般很小）只能環繞一個線圈或一個線圈的一部分。

这些磁通不能促使能量由初级线圈传到次级线圈，故称之为漏磁通。甚至在变压器接于纯有功负荷时，漏磁通也会产生感抗。通常漏磁很大的变压器效率很低。

在制造变压器时，主要应该注意减少磁通泄漏，借以使变压器获得尽可能高的效率。

由于高频技术的特点，在感应装置中必须采用专门的变压器。设计此种变压器时，应当考虑变压器的工作条件，以及由于高频电流所固有的一系列物理现象而产生的要求。

大家知道，高频电流通过导体时，沿导体截面上的电流密度分布是不均匀的。随着频率的增高，电流就会由于所谓趋肤效应而趋向导体的表面层。

在卷成环状或螺旋状的导线内，高频电流不是均匀地分布在导线的整个表面层上，而是主要集中在内侧。这种现象叫做环效应。

如果高频电流沿着两根彼此靠得很近的导线流过，电流的方向相反（例如在来回两线中往往如此），则在两导线彼此相对的一侧电流密度最大。这种现象叫做邻近效应^①。

如果把一块金属放在高频磁场内，则金属将被本身所感应出的电流加热。磁性金属的这种发热现象尤为强烈。

上述各种现象在高频或增高频变压器中也都存在。这些现象决定了高频变压器的结构特点。在许多情况下，工作状态也是高频变压器的一个特性。

用同时加热法加热金属零件以进行淬火、钎焊和堆焊时，加热时间是不长的，一般为5~20秒。

^① 关于趋肤效应、环效应和邻近效应的详细解释，可参看 H. II. 格魯哈諾夫著的“高频加热的物理基础”，本丛书第2册。

零件的冷却、取下和装放新的零件要花費較多的時間。因此，变压器承受負荷的時間仅为每个工作循环的一部分。

用順序連續法加热很大很重的零件时，一个循环中工作部分所占的時間就增加，但同时非工作部分的時間也延长，因为更换很大很重零件所需的時間自然要多一些。自动淬火机床則例外，因为在这种机床上加热过程可以連續进行。

这种在工作中間有或长或短停歇時間的周期性負荷，称为間歇運轉状态。

在类似上述的工作状态下，使用变压器时容許过载，但在連續工作状态下却不容許。因为在停歇時間內，由于各个結構元件能量損耗而产生的余热，可由相应的冷却系統完全帶走。

由于材料能够承受这种热量过载，就有可能縮小設備的尺寸和節約材料的消耗，并使变压器具有更大的通用性。

还應該考虑变压器的某些特殊工作条件，这些条件虽然对結構的影响不大，但却使对高頻变压器的要求愈加复杂化。这就是变压器周圍空气的湿度，由于淬火用水的不断蒸发而增加，并有可能水分直接进入变压器。

在工作过程中，变压器可能受到机械冲击的作用，这种作用是由于移动淬火机床上固装变压器的那一部分及由于电力而引起的。当功率很大而頻率較低时，电力的影响特別显著。

变压器一般是装在加热机床的内部。这就更加要求縮小变压器的尺寸和減輕其重量。变压器的效率应尽可能提高，否則就必然过多地消耗电能，使达到每年数千千瓦小时。

只有当变压器完全符合它的运行条件时，才能获得最大效率。

在不同功率的高頻裝置中，若工作狀態不同，頻率相差 2 倍以上，則利用同一個變壓器是不適宜的，雖然這在實踐中常見到。若變換系數不同，則利用同一磁路在大多數情況下也認為是不適宜的。所有這些，都將會降低高頻裝置的使用指標，破壞經濟合理的工作過程。但是，由於實際上不可能按各自要求的数据製造大量各式品種的變壓器，所以近幾年來開始製造某種程度上通用的變壓器。這種變壓器有可變數目的初級線圈和次級線圈，適用於範圍相當廣的頻率、功率、變換系數和負荷狀態。

2. 倍頻器的工作

倍頻原理是以利用帶飽和鐵芯的有感電路為基礎，這一原理早已為人們所熟知。

還在幾十年以前，由國內 B. II. 伏洛格金教授領導設計的以及由國外設計的各种結構的倍頻器，在機械式發電機作電源的無線電台上已得到了有效的應用。

但是，感應加熱裝置中的倍頻器的要求，與無線電台上用的倍頻器具有很大區別。在後一種情況下，倍頻器可以給出整個頻譜，從該頻譜中利用調諧電路分釋出所需的諧波。此時，倍頻器的負荷在所有參數嚴格穩定下應具有很高的質量因素^①。

在感應加熱裝置中，加熱電路的質量因素是不大的，尤其重要的是它的一些參數在加熱過程中改變很大。因而不可能在整个工作循環期間把電路調到諧振。在此情況下只能採用

① 關於電路的質量因素，可參看 A. G. 瓦西里也夫著的“高頻加熱用電子管振盪器”，本叢書第 9 冊。

这样系统的倍频器,即靠其本身释出所需频率的谐波。

此时,倍频器应该是单相的,因为增高频发生器和负荷通常也是单相的。

下面介绍的倍频器,在颇大程度上符合这些要求。

获得三倍频率的倍频器以下简称为“频率三倍器”,它是由两台芯式变压器组成。其中一台变压器的磁路在磁饱和状态下工作($B=1.9\sim 2.1$ 伏秒/米²),并应尽可能没有空气隙。另一台变压器的磁路远没有饱和($B=0.8\sim 1.0$ 伏秒/米²),

具有可调节的空气隙。

两台变压器接在电源上的初级线圈是串联和匹配的(终端和起端相接),而接有负荷的次级线圈是终端和终端对着串联(图2);或者相反,初级线圈对着串联,而使次级线圈匹配。

第一台饱和式变压器的电感是可变的,随着通过初级线圈的电流增加而减小。

第二台非饱和式变压器的电

感可近似地认为恒定的。两个串联变压器的总电感随着电流的增加而下降。因此,在加于频率三倍器初级一侧为正弦电压时,一次电流曲线将具有非正弦的尖顶形状。

图3示出饱和式变压器(a)和非饱和式变压器(b)中磁通与电流(i)、每台变压器中磁通形状及电压的关系。

饱和式变压器中的磁通具有压扁形状,而非饱和式变压器中的磁通与电流一样,是尖顶形状的(图3c和d)。由这些

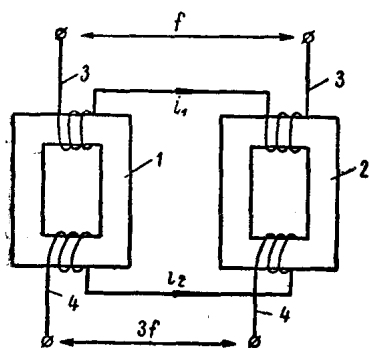


图2 频率三倍器线路图

1—饱和式变压器; 2—非饱和式变压器; 3和4—分别为初级和次级线圈

磁通在变压器线圈内感应出的电动势，示于图 3e 和 κ 。这些电压包含频率由电源规定的一次谐波和其中三次谐波为最大值的高次谐波。图 3e 和 κ 是基波和三次谐波。由图可见，电动势的基波在两台变压器内是同相的，而三次谐波移过 180° 。因此，把初级线圈串联匹配，在一次电路中除去三次谐波，便不至于使频率三倍器输入端的电压曲线形状失真。若将次级线圈对接，几乎可以完全消除一次谐波，而使电压的三次谐波相加（图 3g）。结果，在输出端得到频率几乎增至 3 倍的正弦电压。

完全补偿初级一侧的三次谐波和次级一侧的基波是办不到的。此外，处于不同相位关系的高次谐波大大弱化。结果，三倍频率的

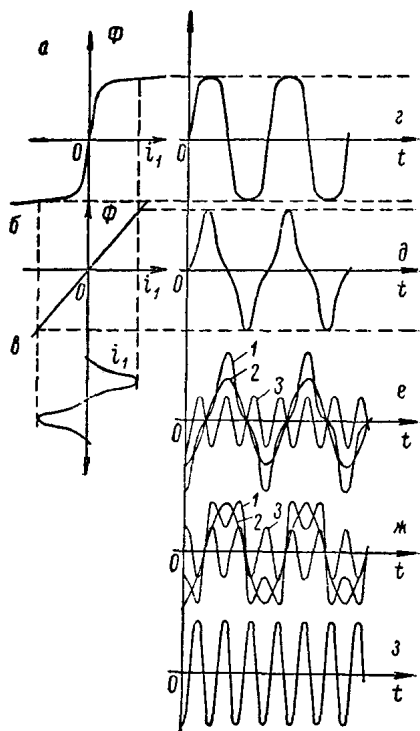


图 3 频率三倍器中磁通、电流和电压的形状

a—饱和式变压器中磁通与一次电流的关系；b—非饱和式变压器中磁通与一次电流的关系；c—倍频器的一次电流；d—饱和式变压器铁芯中的磁通；e—非饱和式变压器铁芯中的磁通；f—饱和式变压器线圈内感应的电动势；g—非饱和式变压器线圈内感应的电动势；3—频率三倍器输出端上三倍频率的电压

1、2、3—基本曲线、基波和三次谐波

一次电压和二次电压不完全是正弦的。但与正弦曲线偏离不大,特别因为一次电路和二次电路是用电容器调谐的。

为了更充分地利用饱和式变压器钢磁化特性曲线的曲线度,变压器的磁导体应装配成带最小的空气隙。

相反地,若利用非饱和式变压器磁导体内的间隙,则磁化曲线接近于直线。间隙的总和为5~8毫米,调节间隙的大小,频率三倍器可得到最佳的参数。

此外,变换初级线圈的匝数,可在某个范围内改变频率三倍器的参数。

在相同的负荷下,频率三倍器的工作状态首先是输出功率,决定于变压器磁导体内的感应强度,也即决定于输入频率三倍器的电压。

在频率三倍器单独供电的情况下,建立固定的电压并不困难。但是,采取集中供电系统时从干线接出若干支线到各部位上,所以在发生器电压不变下接通和断开另一些部位,都会使其余部位上的电压改变,而不能保持恒定。因此,频率三倍器所输出的功率改变:电压降低时功率显著减小,电压升高时功率显著增大。此时,一次电路内所包含的谐波也改变,因而破坏了照例调至电容反应的对高次谐波来说电阻很小的相邻部位的工作。

如将调至三次谐波的滤波器接入频率三倍器的一次电路内,则可在母线电压变动范围为580~730伏时保证频率三倍器和整个系统的工作都很稳定(图4)。滤波器尺寸很小,所以与频率三倍器一样,可以装在加热部位的里面。

频率三倍器输入端的功率因数很小($\cos \varphi_1 \approx 0.2 \sim 0.3$),因而要求在其初级端子上接一电容器组,此电容器组的无功功率约为发生器所需的有效功率的5倍。

二次电路即加热电路，通常調至不大的电容反应 ($\cos \varphi_2 \approx 0.9 \sim 0.95$)。

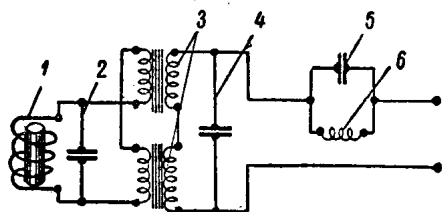


图4 频率三倍器接入調至三次諧波的滤波器的线路图

1—感应器及加热零件；2—加热电路的电容器組；3—频率三倍器的变压器；4——一次电路的电容器組；5—調至三倍频率的滤波器的电容器組；6—滤波器的电感

3. 增高频率变压器和倍频器的磁导体

频率为 500~10000 赫芝的增高频率变压器与频率为 50 赫芝的装置上所用的普通电源变压器一样，最好制成带硅钢片磁导体的。

射频变压器最适于采用氧磁体制的磁导体。

置于交变磁场内的钢片，由于反复磁化的损耗以及内部感应的电流而剧烈地发热。此时，单位体积内耗散的功率大致与频率的平方成比例地增加。钢片的厚度减小，铁损即随之降低，但当硅钢片中的含硅量比较高(4~4.8%)时，显得非常脆，要轧成厚度小于 0.1 毫米的钢片，在生产上遇到很大困难。

此外，在增高频率变压器中采用非常薄的钢片制造磁导体，会破坏其冷却条件和减小占空系数。

上述这些情况，在目前限制了可以采用硅钢片磁导体的声频范围。

目前工业上已生产了若干种硅鋼片，表 1 所列的数种可用于制造高频装置的磁路。

表 1

旧的名称	按 ГОСТ 802-54 的名称	鋼片的标准厚度(毫米)	鋼片的标准尺寸(毫米)	备 注
34A	341	0.35~0.5	750×1500 1000×2000	厚度 0.2 毫米的鋼片尺寸
34AA	342	0.35~0.5	750×1500 1000×2000	
BЧ-2	344	0.1; 0.15; 0.2; 0.35	700×1400 700×720	

342 鋼特別 344 鋼，在相同的工作条件下可以保证比 341 鋼的損耗系数小，因此前两种鋼主要在高頻时采用。

如果变压器內磁通的方向与鋼片平面的方向不一致，則在高頻和增高頻下即使鋼片的厚度非常薄，也能在磁导体的硅鋼片內感应出相当大的电流。因此，最好用很細的鋼絲来代替鋼片。可是制造这种鋼絲也很困难，因为硅鋼非常脆。

增高頻变压器的磁导体是制成壳式(图 5a)或芯式(图 5b)的。在壳式变压器中，繞在鉄芯上的綫圈是被軛鉄包住

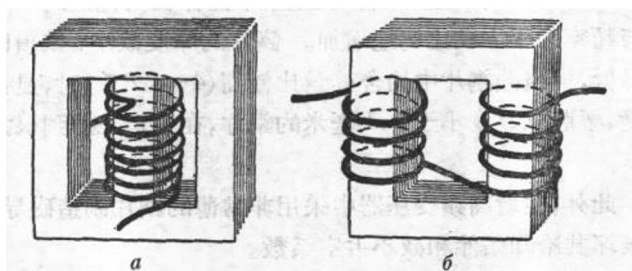


图 5 变压器的磁导体

a—壳式；b—芯式