# 高频电阻焊变压器的设计

南昌航空工业学院材料科学与工程系 （江西 330034） 冀春涛 肖 璨

摘要：本文讨论了用于逆变点焊机的高频变压器结构、铁心、绕组和冷却系统设计问题，对工作频率、工作电压、绕组匝数、铁心截面积等要素进行了分析、选择和计算。所研制的170kV·A、1kHz变压器与相同功率的单相工频点焊变压器相比体积减少了70%，重量减轻了60%。

## 一、概述

普通电阻焊变压器工作频率为50Hz，而高频点焊变压器工作在1kHz或更高的频率，传递的是矩形交替脉冲，其主要作用是电压变换（降压）、功率传递和实现输入输出之间的隔离。高频点焊变压器无论从结构、工作原理或设计方法看，都不同于弧焊变压器，其特点主要有：①二次电压低，电流大。②负载持续率低，工作不连续。③传输功率较大，工作频率较弧焊电源为低，一般二次侧有中心抽头。

交流输入电压范围为380V ± 76V，三相全桥整流为每周期（20ms）六个波头。负载重时，滤波电容上的电压几乎与整流后一样，轻载时又几乎为峰值电压，所以，直流母线上的电压变化范围是410 ~ 540V。

## 二、变压器的设计

### 1. 变压器的构造

铁壳式磁路系统的变压器在同样的心柱截面尺寸下可以节约一些材料。此外，在铁壳式导磁体中，绕组之间产生的动态力较之铁心式导磁体简单得多，而且容易通过绕组的适当固定方式得到补偿。导磁体用两铝合金框架夹紧，这两个框架同时还用于安装和固定变压器。

### 2. 铁心材料的选择及设计计算

铁基非晶合金是近20年刚刚发展起来的一种新型磁性材料。由于非晶材料比较脆，所以一般制成环形或矩形铁心，并且不开气隙，因为切开后其性能会变坏，铁损增加。在选用铁基非晶合金时（物理性能见表1），其每片厚度为0.03mm，用漆绝缘。

表1 铁基非晶合金（国标牌号1K101）的物理性能

| 饱和磁感应强度 $B_S$ | 居里温度 $T_c$ | 晶化温度 $T_x$ | 饱和磁致伸缩系数 $\lambda_s$ |
|---|---|---|---|
| 1.56T | 410℃ | 550℃ | $27\times10^{-6}$ |
| 硬度 HV | 密度 $d$ | 电阻率 $\rho$ | — |
| 960 | 7.18g/cm$^3$ | 130Ω·m | — |

变压器的导磁体截面积按下式计算：

$$U_1 = KSBN_1 f \times 10^{-4}$$

式中 $U_1$——一次绕组上的电压，V；

$K$——波形系数，对方波为4；

$S$——磁心有效截面积，cm$^2$；

$B$——工作磁感应强度，T；

$N_1$——一次绕组的匝数；

$f$——工作频率，Hz。

已知：饱和磁感应强度 $B_S = 1.56$T，逆变器的工作功率170kV·A，最大工作电流 $I_{max} = 20000$A，二次电压 $U_2 = 8.5 \sim 13$V，考虑网压波动，一次电压 $U_1 = 410 \sim 540$V，二次绕组的匝数 $N_2 = 1$，工作频率 $f = 1$kHz。$S = U_2 \times 10^4/4fN_2B = 20.83$cm$^2$；$N_1 = U_1 \times 10^4/4SfB = 31.56$，取 $N_1 = 32$ 匝，$N_2 = 1$ 匝。

一般设 $S = Lm$，$m = 1.45L$（$L$ 为长，$m$ 为厚度），则铁心毛面积 $S' = 26$cm$^2$，0.8为有效截面系数。长 $L = 38$mm，厚度 $m = 55.1$mm，铁心毛厚度 $m' = 55.1/0.8 = 68.8$mm。铁基非晶合金层数为 $N = 55.1/0.03 = 1837$ 层，裁剪尺寸如下：$P1$（204mm × 19mm × 0.03mm），2 × 1837片，共3674片；$P2$（204mm × 38mm × 0.03mm），共1837片；$P3$（104mm × 19mm × 0.03mm），2 × 1837片，共3674片；$P4$（208mm × 19mm × 0.03mm），共1837片。装配前，各叠片应清除毛

刺、去油并涂上绝缘漆。装配后，叠片要压紧并用绝缘的螺栓穿过每片的孔将叠片拉紧。变压器铁心的质量为：$m=9.26kg$，其结构见图 1。

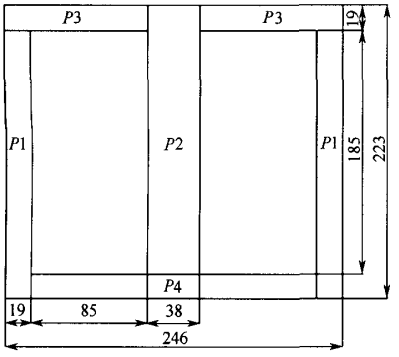


图 1　变压器铁心结构图

### 3. 一、二次绕组线圈的设计计算

逆变点焊电源的工作频率在 1kHz 以上，在选择电流密度和导线线径时必须考虑由于集肤效应引起的有效截面积的减少。二次线圈绕制成一圈，由于电流大而且要求变压器尺寸尽可能的小，所以二次线圈使用水冷，二次侧大电流绕组（见表 2）采用宽而扁的铜带。用正方形双铜管内边长为 4mm，外边长为 9mm，并用漆绝缘。同二次绕组各盘钎接在一起的连接板，钻有孔道以通过冷却水，用以冷却连接板和用螺栓固定于连接板上的母线。绕组每层之间用环氧玻璃漆布绝缘，厚度为 0.2mm，型号 2433。

**表 2　冷却系统、绕组构造与许用电流密度关系**

| 冷却系统方式 | 绕组构造 | | 许用电流密度/A·mm$^{-2}$ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 一次绕组 | 二次绕组 | 一次绕组 | 抽 头 | 二次绕组 |
| 水冷的二次绕组 | 铜导线制成的盘状绕组 | 铜管制成的盘线圈 | 3.5～4.5 | 3.0～3.5 | 10～20 |

为了防止绕组沿心柱位移，以及绕组之间相对位移，通过楔块将绕组固定住。装配好的绕组组件用专门的装配拉紧。为了使装配好的变压器具有更好的刚度和抗潮湿能力，对它的骨架浸以漆并进行随后处理。

变压比 $n=410V/13V=31.5$；取导线电流密度 $J_1=4A/mm^2$，$J_2=15A/mm^2$，计算得相应的一次、二次线圈的横截面积 $S_1=120.1mm^2$，$S_2=942.8mm^2$。取扁铜线长为 18mm，宽为 7.1mm，因为 $18\times7.1=127.8mm^2$，接近于 $120.1mm^2$。

$T_a=A-a=7.6-7.1=0.5mm$，$T_b=B-b=18.4-18=0.4mm$。

一次线圈（见图 2）总共 32 匝，取 4 个 5 匝的盘，2 个 6 匝的盘。

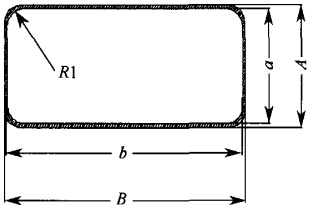


图 2　一次线圈横截面示意图

一次线圈铜线型号：SBECB；名称：双玻璃包扁铜线；使用温度为：130℃；击穿电压为：550V；倒角为：$R=1mm$。

绝缘体：环氧玻璃漆布；型号：2433；标准厚度：0.2mm；耐热等级：B。

取用双铜管做二次线圈 $T_a=A-a=9.4-9=0.4mm$；$T_b=B-b=4.2-4=0.2mm$。二次线圈（见图 3）总共 8 匝，两盘并联，则总截面为 $16\times(9^2-4^2)=1040mm^2$，接近于 $942.8mm^2$。

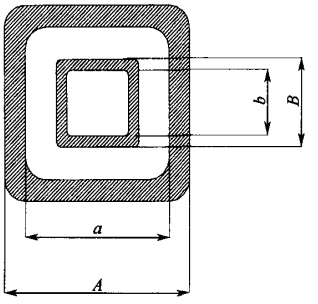


图 3　二次线圈横截面示意图

双铜管材料：环氧树脂漆包双铜管；型号：1033，颜色：黄裸色；干燥类型：气干；耐温等级：B 级，在 130℃下长期使用，漆膜的软化击穿温度不低于 200℃；倒角：$R=1mm$。在 1kHz 时穿透深度为 2.1mm，这里双铜管臂厚度为 2.5mm 符合条件。

### 4. 变压器窗口的设计与校核

由于绕组中有绝缘物、各种垫片和冷却管道，所以变压器磁路系统的窗口要较绕组金属的截面大。一次、二次线圈径向尺寸取决于线圈匝数、导线尺寸以及绝缘厚度等，求得：$A_1=52.8mm$，$A_2=78.2mm$。一、二次线圈的轴向尺寸，取决于

绕组导线的宽度及绝缘的厚度 $B = B_1 + B_2 + \Delta =$ 181mm，则窗口（见图 4）面积取 185mm × 85mm = 15725mm²，在 11000mm² 和 17500mm² 之间，符合相应的二次电流许用条件。

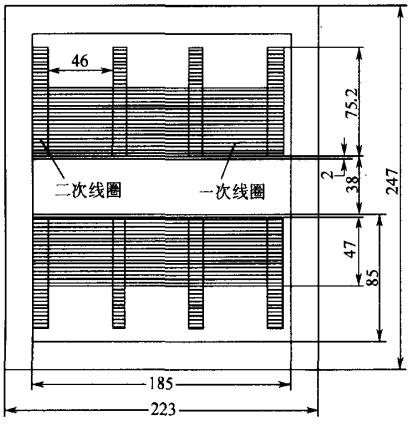


图 4　窗口一、二次线圈示意图

一般要求是窗口利用系数 $Kc$ 大于等于实际的窗口占用系数 $Kc'$。对大功率的逆变器，导线面积大，考虑集肤效应，选宽铜带，绝缘材料占得多，再考虑骨架，$Kc$ 就比较小，窗口利用系数 $Kc$ 取 0.25 ~ 0.4。

实际的窗口占用系数 $Kc'$ 由下式给出：

$$Kc' = (S_1 N_1 + S_2 N_2)/Ac$$

式中　$S_1$——一次线圈横截面积，mm²；

$S_2$——二次线圈横截面积，mm²；

$N_1$、$N_2$——一、二次线圈匝数；

$Ac$——实际窗口面积，mm²。

计算得：$Kc' = 0.32$，因为 $Kc'$ 小于 $Kc$，符合设计要求。

**5. 变压器质量与体积的估算**

一次线圈共有六盘，线圈的宽度为 0.018m，估算质量为：$m_1 = \rho V_1 = 1.86$kg。二次线圈的横截面积为 $65 \times 10^{-6}$m²，线圈的总长度为 0.4m，共 4 盘，8 匝，估算质量为：$m_2 = \rho V_2 = 6.84$kg。由于压板的结构比较复杂，将其分成低板、肋板和圈三部分来算，不计螺纹孔的尺寸及质量，估算铝合金压板总质量：$m_{板} = 2.85$kg。电极板的尺寸为 20mm × 100mm × 201mm，不计铜板内水路的尺寸及质量，正负电极板的质量：$m_{电极} = 3.6$kg。外表封装盖估算为 5kg，铁心质量为 9.26kg。

变压器总质量：$m_{总} = m_{铁} + m_1 + m_2 + m_{板} + m_{电极} + \Delta = 31$kg。

式中 $\Delta$ 表示一些绝缘材料及附加零件的质量。

变压器的尺寸为：长 26cm × 宽 23.7cm × 高 26.5cm。

**6. 冷却系统的设计计算**

根据被冷却组元中的损耗，可以求出冷却水的流量 $Q = 7.2$L/min。为了对二次绕组组件进行水冷，在线圈盘的侧面应该钎焊冷却水管，水管内径应当保证能通过规定的冷却水量，经计算冷却水管的内径取 10mm。

## 三、结语

我校研制的高频逆变直流点焊变压器，铁心材料选用铁基非晶合金，一次侧为固定匝数、二次侧为二匝（中心抽头）、双铜管水冷，使用铁壳式导磁体和盘状绕组，相比于一般工频变压器其突出特点在于体积小、重量轻。与相同功率的工频点焊变压器相比体积减少了 70%，累积总重 31kg，而同功率的工频变压器在 85kg 以上，变压器的重量减少了 60%。由于二次侧使用水冷，温升不到 10℃，满足了使用要求。热　(20040615)

## 敦煌国际焊接学术论坛——暨第四届中国北方焊接学术会议在敦煌召开

敦煌国际焊接学术论坛——暨第四届中国北方焊接学术会议是由中国机械工程学会焊接分会、日本焊接学会、兰州理工大学、甘肃省机械工程学会焊接学会共同主办的。敦煌国际焊接学术论坛旨在加强国内与国际焊接界的学术交流与合作，促进我国先进材料焊接与连接技术、新型焊接材料、先进焊接设备及焊接自动化等的研究开发与推广应用，推动我国焊接技术创新与产业发展。

本次会议于 2004 年 8 月 20 ~ 25 日在中国文化艺术旅游胜地——甘肃省敦煌市敦煌宾馆举办。来自全国各高等院校、研究院所及企业的代表共 140 余人参加了此次行业盛会，会议邀请国内外著名专家、学者参加并作学术报告。

中国兵工学会焊接学会会议、中国焊接学会金属焊接性及焊接材料专委会会议、中国焊接学会焊接力学及结构设计制造专委会会议与本次会议联合举办。

会议在承办单位兰州理工大学、甘肃省机械工程学会焊接学会的周密策划下，取得圆满成功。