

非晶态合金在脉冲变压器中的应用

许 早 樊岳良

(南京电子技术研究所)

脉冲变压器首次应用是在第二次世界大战期间的雷达发射机上。四十多年来脉冲变压器不仅在军事上,而且在激光、加速器、电力、除尘、计算技术等方面得到应用。

作为脉冲变压器铁芯,过去常用的材料有硅钢,坡莫合金及铁氧体。非晶态软磁合金材料问世后,各国相继开展非晶态合金材料在脉冲变压器中的应用的研究。目前,应用于脉冲变压器的非晶态软磁合金材料有钴基和铁基二类。钴基多用于小功率窄脉冲宽度的脉冲变压器,铁基多用于大中功率的脉冲变压器。非晶态软磁合金材料由于它的电阻率 ρ 及脉冲磁导率 μ_p 比晶态材料(硅钢及坡莫合金类)高,磁感应增量比铁氧体高得多,所以它在某些场合下的优越性大大地超过硅钢、坡莫合金及铁氧体。

一、器件工作状态及对铁芯材料的要求

脉冲变压器铁芯的工作状态,根据电路的具体情况,可分为部分回环、直流偏置和充电电流偏置三种工作状态。

1. 部分回环工作状态及对铁芯材料的要求

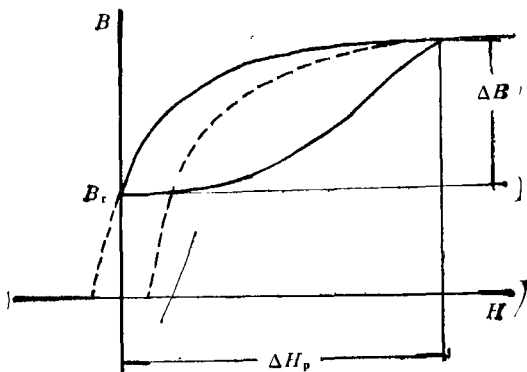


图1 部分回环工作状态

中小功率脉冲变压器,在脉冲间隔期间通过脉冲变压器的反向电流为零或很小情况下,采用部分回环工作状态,如图1所示。这种工作状态要求铁芯的磁性能为低 B_r 、高脉冲磁导率和低损耗。常用的铁芯材料有铁氧体、坡莫合金、硅钢及非晶态合金。用硅钢做铁芯时,多采用切开铁芯,坡莫合金、非晶态合金多用作恒导磁材料,以提高磁感应增量 ΔB 值。

2. 直流和充电电流偏置工作状态及其对材料的要求

大中功率、中等脉冲宽度的变压器,其电压较高,在脉冲间隔期间通过脉冲变压器的反向电流足够大的情况下,利用这部分电流对铁芯反向磁化,使工作点移到磁滞回线 $-B$ 轴,接近于 $-B_r$ 点。这样可使磁感应增量 ΔB 及脉冲磁导率 μ_p 大大提高,如图2所示。

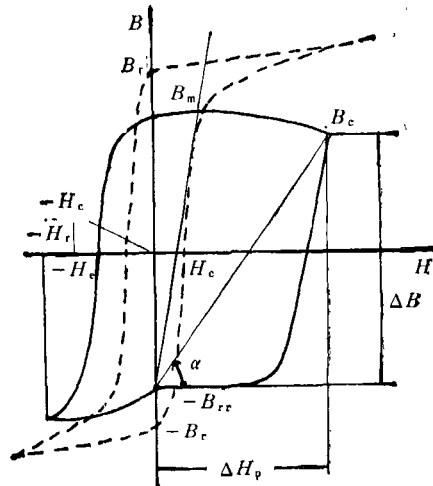


图2 充电反磁化工作状态

对于大功率高压脉冲变压器,当脉冲间隔期间通过脉冲变压器反向电流很小时,为了提

高脉冲性能,充分发挥铁芯材料的作用,提高磁感应增量 ΔB 和脉冲磁导率 μ_p ,减小体积,往往采用直流偏置(即复位),即在脉冲变压器的初级或增加的第三绕组中通过一个恒定的直流(与脉冲电流方向相反),产生一个直流磁场,人为地使铁芯的工作点保持在磁感应负向拐点附近,如图 3 所示。

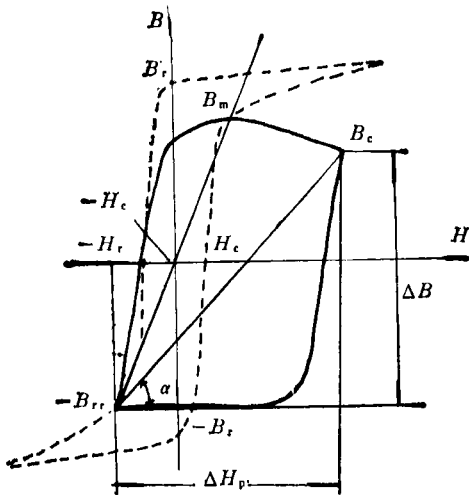


图 3 直流偏磁工作状态

上述两种工作状态多采用高矩形比材料,并且希望矫顽力越小越好,铁芯不切开。常用的材料有硅钢,坡莫合金及铁基非晶态合金。

二、应用非晶态合金铁芯的优越性

脉冲变压器性能主要取决于输出脉冲波形和变压器的温升。图 4 为典型的脉冲波形, U_p 为脉冲电压, τ_p 为脉冲宽度, t_r 为脉冲前沿上升时间, U_d 为顶部电压降落的绝对值,脉冲顶部降落的相对值 $D_c = U_d/U_p$ 。由于脉冲变压器是传递脉冲能量的,所以脉冲波形越接近矩形方波愈好。实际上,由于铁芯的脉冲磁性能为有限值及变压器本身结构上带来的漏感和存在分布电容,因而变压器的输出波形必然产生畸变。对于脉冲变压器来说,应使这种畸变(即脉冲前沿 t_r 及顶部降落 D_c) 尽可能小,同时体积及重量也应尽量小。

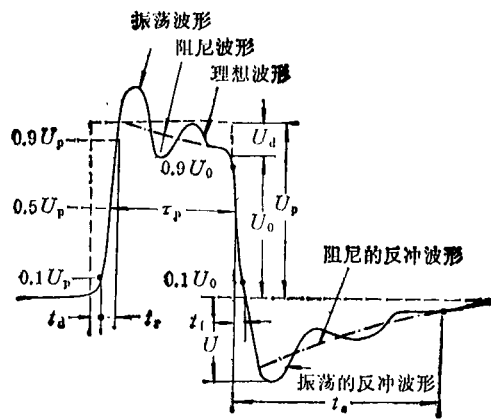


图 4 典型的脉冲波形

脉冲变压器的核心是铁芯,因而铁芯性能的好坏,指标高低将直接和间接地控制着脉冲变压器的输出波形。为此,要求铁芯具有二高一低的特性,即磁感应增量 ΔB 值高,脉冲磁导率 μ_p 值高及脉冲损耗低。下面分别介绍磁感应增量 ΔB 值,脉冲磁导率 μ_p 值及脉冲损耗与脉冲变压器指标的关系。

1. 磁感应增量及脉冲磁导率与变压器性能的关系

要设计出脉冲前沿 t_r 小顶降小的脉冲变压器,磁感应增量 ΔB 值与它对应的脉冲磁导率 μ_p 值是十分重要的参量,是设计脉冲变压器的关键数据。要减小脉冲变压器输出波形的前沿失真,必须要使漏感和分布电容的乘积减小,减小漏感和分布电容的方法除改变绕组型式外,最有效最简单的方法是提高 ΔB 值,以减小绕组匝数,使脉冲前沿失真减小。下面的脉冲前沿与 ΔB 的关系式可十分清楚地说明这一点。

$$t_r = \frac{K}{\sqrt{A_{cn}}} \cdot \left[\frac{U_p \tau_p}{\Delta B} \right], \quad (1)$$

式中 K 为与脉冲变压器结构有关的系数, U_p 为脉冲电压, τ_p 为脉冲宽度。 U_p 和 τ_p 是给定的指标,当铁芯截面积 A_{cn} 和系数 K 一定时,磁感应增量 ΔB 值越高,脉冲前沿 t_r 就越小;当脉冲前沿 t_r 保持基本不变时, ΔB 值越高,则铁芯截面积 A_{cn} 就可得到减小,从而减小了脉冲变压器的体积。

在脉冲顶部,对脉冲平顶发生作用的参数

只有励磁电感,电路阻抗和脉冲源动态内阻,从脉冲顶部瞬态特性推导出来的顶部降落的计算公式为

$$D_c = \frac{R_p R'_L}{R_p + R'_L} \cdot \frac{\tau_p}{L_m}, \quad (2)$$

式中 L_m 为励磁电感。(2)式表明,脉冲顶降 D_c 与励磁电感成反比,而励磁电感与脉冲磁导率成正比;在其它条件不变的情况下,当脉冲磁导率越高,则顶降 D_c 就越小,反冲和激磁功率也越小。

目前我国研制的非晶态合金,大功率铁基非晶态合金的磁感应增量 ΔB 值可与硅钢和坡莫合金 1J511 的水平相比,脉冲磁导率 μ_p 值高于硅钢和坡莫合金 1J511。中功率铁基非晶态合金的磁感应增量 ΔB 值与切开硅钢铁芯和坡莫合金 1J512 和 1J6721 水平相当,脉冲磁导率 μ_p 值比硅钢切开铁芯和 1J6721 高。小功率钴基非晶态合金的磁感应增量 ΔB 值和对应的脉冲磁导率 μ_p 值比坡莫合金 1J792 和铁氧体高,因而使脉冲变压器输出波形失真减小,特别是顶降可得到大大的改善,提高了脉冲变压器的技术性能,此外,应着重提出的是,大功率铁基非晶态合金的矫顽力大大地小于硅钢。通常前者小于 8A/m,后者约为 31.8A/m 左右。由此可见,铁基非晶态合金铁芯处于直流偏置工作状态时,所需的偏磁电流会大大减小,在充电偏置工作状态时,所需的充电电流也将大大减小。对于较大功率或脉冲宽度较窄的脉冲变压器来说,使用硅钢铁芯时,充电电流往往达不到充电偏置的目的。然而对于铁基非晶态合金来说,由于矫顽力较低,则可显示出它的优越性,它能将铁芯工作点移至 $-B$ 轴,使磁感应增量大大提高,达到充电偏置的要求,使波形得到改善,体积重量大大减小。

2. 铁芯损耗与脉冲变压器温升的关系

对于脉冲变压器来说,除考核脉冲波形外,温升也是一个很重要的考核指标,它由铁芯损耗和铜损产生。在窄脉冲高重复频率时,铁损是产生温升的主要因素。铁芯损耗是指在使用

的脉冲平均损耗,这个损耗包括经典涡流损耗、准静态磁滞损耗及反常损耗。经典涡流损耗公式为

$$P_b = \frac{\Delta B^2 \delta^2 A_c n^2 c f}{12 \tau \rho} \times 10^{-10}, \quad (3)$$

式中 δ 为带厚, ρ 为铁芯材料的电阻率。从(3)式可以看出,铁芯材料的电阻率 ρ 与经典涡流损耗成反比。由于非晶态合金的电阻率约为晶态合金的三倍,因而经典涡流损耗只有晶态合金的三分之一。准静态磁滞损耗是由于材料中不可逆磁化过程引起的,其值等于直流磁滞回线面积,与材料的矫顽力 H_c 有密切关系。硅钢的矫顽力为非晶态合金的三倍以上,因而非晶态合金的准静态磁滞损耗低于硅钢的三分之一。反常损耗是指实测的总损耗减去经典涡流损耗及准静态磁滞损耗之和而剩下的损耗。根据非晶态合金测得的交流损耗可知,钴基非晶态合金的交流损耗低于高镍坡莫合金 1J792 和 1J851。铁基非晶态合金的交流损耗小于低镍坡莫合金 1J512, 1J34, 1J6721 及硅钢,因此非晶态合金在脉冲状态下的损耗也将较低,温升也就较低,提高了脉冲变压器性能。

综上所述,用非晶态合金作脉冲变压器,其输出脉冲波形及温升均优于晶态合金。

三、应用实例

下面列举五个我国的应用实际例子进一步说明其优点所在。

例一 小功率脉冲变压器

这种变压器的脉冲宽度: 0.05 μ s; 重复频率: 2000Hz; 脉冲功率: 2500 W。

对于这种窄脉冲宽度、高重复频率、平均功率极小的脉冲变压器,可供选择的铁芯材料有坡莫合金 1J792、钴基非晶态合金及铁氧体。由于铁氧体的磁感应增量 ΔB 值太低,故只选用了钴基非晶态合金和 1J792 两种材料分别进行了比较。在相同尺寸及结构情况下,由于钴基非晶态合金的脉冲磁导率高,故所需的激磁电流小,初级匝数比 1J792 可减少 25%,前沿

得到了明显的改善。此外，钴基非晶态合金仍能继续加高电压，而 1J792 已趋于临界状态。

例二 1W 小功率高频脉冲变压器

该变压器是一种用于晶体管脉冲电路中的级间耦合脉冲变压器，要求变换重复频率为 200kHz，脉冲宽度为 $1\mu\text{s}$ 的脉冲。指标要求较高。试验证明钴基非晶态合金作的变压器性能大大地优于 1J792 和铁氧体变压器。

例三 中功率脉冲变压器

该变压器的脉冲宽度： $3\mu\text{s}$ ，编码工作时脉冲宽度为 $0.25\mu\text{s}$ ，码距为 $0.5\mu\text{s}$ ；脉冲功率：6000W。

该脉冲变压器使用铁基非晶态合金做铁芯后，其脉冲性能比硅钢高三倍，比 1J67h 提高一倍。

例四 大功率脉冲变压器

该变压器的脉冲宽度： $11\mu\text{s}$ ；重复频率：

200Hz。脉冲功率：2MW。

这台脉冲变压器用铁基非晶态合金制成矩形窗口铁芯代替硅钢薄带铁芯后，使得输出脉冲顶部降落仅为原来的 40%，温升为原来的一半，使脉冲变压器性能得到了明显提高。

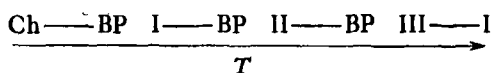
例五 大功率脉冲变压器

该变压器的脉冲宽度： $3\mu\text{s}$ ；重复频率 400Hz；脉冲功率 1.7 MW。

该脉冲变压器铁芯原采用硅钢，由于硅钢的矫顽力 H_c 大，电路中通过脉冲变压器初级的反向电流不够大，不能充分起到偏置作用。铁芯改用铁基非晶态合金后，由于它的 H_c 只有硅钢的 1/4，使电路中通过脉冲变压器初级的反向电流充分发挥了偏置作用，因而使波形得到了改善。其重量仅为原来的 33%，体积约为原来的 13%，获得了明显的效果。

(上接第698页)

蓝相出现在各向同性相 I 和胆甾相之间，通常只有几度的温度范围，它还可再分为三个子类：BP I，BP II，和新近确定的雾状相 BP III^[6]，其相序一般为



目前认为 BP I 相是体心立方，BP II 是简单立方。BP 相还具有类似 Ch 相的选择反射、旋光性等只有螺旋结构才具有的性质，因而引起人们对其结构的兴趣。迄今，S_D 相和 BP 相的构造模型的解释还没有统一。

除了上述液晶相以外，它们还存在各种亚类。例如，S_A 相还存在 S_{A1}，S_{A2}，S_{A3} 以及 S_{A4} 相，具有强极性基团，如氰基（—CN）的分子的液晶相可以呈现上述相。S_{A1} 相的层间距约为分子长度，S_{A2} 相的层间距大致为二倍分子长度，S_{A3} 相是非公度相，其层间距在 1—2 倍分子长度之间，S_{A4} 相层内分子方向呈现周期性。S_C 相也存在类似的亚类。S_B 和 S_E 相还分别

存在平行于层面和垂直于层面的调制相，记作 S_B 和 S_E，其分子质心的密度波分别受到横向与纵向长波调制。

液晶相结构的研究非常活跃，新的液晶还在诞生，将来的液晶家族一定更加庞大。

参 考 文 献

- [1] 王新久, A. J. Leadbetter, G. Etherington, 清华大学学报, 26-6(1986), 48.
- [2] 王新久, 陶琨, 赵静安, 清华大学学报, 25-4(1985), 41.
- [3] A. J. Leadbetter, R. M. Richardson and C. J. Carlile, *J. Phys.*, (Paris), 37(1976), 65; A. J. Leadbetter, J. C. Frost and M. A. Mazid, *ibid*, 40(1979), 325.
- [4] G. W. Gray and J. W. G. Goodby, *Smectic Liquid Crystals*, Leonard Hill, Glasgow, (1984).
- [5] 王新久, 赵静安, 物理学进展, 6(1986), 452.
- [6] D. Demus, A. Gloza, H. Hartung, I. Rapthel and A. Wiegeleben, *Cryss. Res. Technol.*, 16(1981), 1445.
- [7] G. Etherington, A. J. Leadbetter, X. J. Wang (王新久), G. W. Gray and A. Tajbakhsh, *Liquid Crystals*, 1(1986), 209.
- [8] S. Meiboom and M. Sammon, *Phys. Rev. Lett.*, 44(1980), 882; H. Onusseit and H. Stegemeyer, *Z. Naturforsch. A*, 36(1981), 1083; H. Stegemeyer et al., *Liquid Crystals*, 1(1986), 3.