

264705

國外軟磁材料

(脉冲变压器及铁芯)

上海钢铁研究所编



上海科学技术情报研究所

国外软磁材料

(脉冲变压器及铁芯)

上海钢铁研究所编

上海科学技术情报研究所出版

新华书店上海发行所发行

上海商务印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 3 字数: 67,000

印数: 1—8,600

1973年8月出版

代号: 151634·126 定价: 0.40元

(只限国内发行)

前 言

为适应我国国民经济及国防事业发展的需要,贯彻伟大领袖毛主席提出的“鼓足干劲,力争上游,多快好省地建设社会主义”总路线的精神,我们遵照毛主席“洋为中用”的教导,收集了近年来有关国外软磁材料的一些资料,编译出版了《国外软磁材料》译文集。

本译文集共分为三册。第一册为“磁畴及损耗”、第二册为脉冲变压器及铁芯”、第三册为“硅钢及其他软磁材料”。

软磁材料所涉及的范围是很广的。例如它们的生产制造工艺、分类、性能、应用以及各种机理研究等均应属于报导的内容。本译文集在编译过程中取材仅限于采用磁畴观察分析及反常损耗机理等的研究以改进软磁材料性能的文献报导,此外对脉冲变压器的设计、测量方法及铁芯材料也作了一般介绍,是属于专题性质的报导,以供有关人员作参考之用。

本译文集由北京钢铁学院、北京冶金试验厂、上海钢铁研究所等单位共同参加下完成的。由于经验不足和水平有限,对工作中所存在的缺点和错误,请读者们提出宝贵意见,以利改进。

编者 1973.6

目 录

脉冲变压器.....	1
贝尔实验室关于脉冲变压器的设计与性能.....	14
脉冲变压器铁芯的发展.....	19
雷达用脉冲变压器偏置铁芯的性能.....	21
脉冲变压器 I. 铁镍合金的应用	23
高磁感增量、高脉冲导磁率 Ni-Fe-Cu-Mo 合金的生产方法.....	27
脉冲变压器委员会脉冲变压器铁芯的标准测试方法.....	31

脉 冲 变 压 器

Harold W. Lord

【摘要】 二次世界大战期间,发展一种为雷达应用的脉冲变压器,它能传输脉冲宽度小于1微米的矩形脉冲电压。其主要功用是强功率微波高频电子管发生器和电子脉冲发生器与同轴传输电缆间之匹配,以及保证倒相和脉冲发生器电路内的阻抗匹配。脉冲变压器的主要要求是能生产一种薄的铁芯磁性材料,这种材料在增值磁感应10,000高斯下1微秒时的脉冲导磁率为500~3,500。全密封干式绝缘系统的发展使可能生产在12千伏以下运行的干式脉冲变压器。

脉冲变压器的发展工作是与分析计算相结合的,这使脉冲变压器设计者可以设计出满足雷达线路设计者要求的脉冲变压器。这种分析是将脉冲变压器三个主要参数:磁感、漏感和有效分布电容,以及电路参数:电源内阻、有效负载电阻和负载分路电容,与输出脉冲的上升时间、顶端纹波及其下落和下降时间联系起来。

目前脉冲变压器的尺寸、功率和脉冲宽度的范围很广泛。在计算机应用中的小型脉冲变压器,脉冲宽度小于0.1微秒时输出电压仅几伏,但是在直线加速器应用的大型脉冲变压器,脉冲宽度为3微秒时输出电压达270千伏,输出脉冲功率为70兆瓦。

1. 引 言

脉冲变压器这个名称可以应用到把任何一个电脉冲源与一个负载耦合的变压器。广义来讲,汽车上的点火线圈是一个“脉冲变压器”。在本文中,这名称的意义通常限于传输宽度较短的矩形电压和电流脉冲变压器。脉冲可以在有规律的或无规律的时间间隔内重复,脉冲间隔周期比起脉冲宽度来得长。在这种运用形式下,传输到负载的功率,其峰值功率对平均功率之比很大。这个名称也用于指除了波形外附合上述标准的某些变压器。这包括计算机电路中低功率短脉冲装置和火花隙用高压触发变压器。

正如缩写SR常用于指饱和电抗器一样,缩写PT常用来指脉冲变压器。为简便

起见,本文即用缩写PT来表示脉冲变压器,因为同样的字母在配电方面是指电压互感器,本文则特地指明。

(1) 本文范围

本文只述及美国的PT生产技术,叙述磁性材料发展的重要部分对PT发展的贡献。重点放在中功率和强功率,简单地讨论一下低功率装置。本文主要是指导性的,并将示出实用电路和变压器参数对PT性能的关系。同时将讨论电子装置的发展对于PT的要求。

(2) 脉冲变压器的历史

由于在二次世界大战初期所发展的雷达系统,其电流变化对于微波磁控管输出频率之影响,搞雷达系统的人们发明了脉冲发生器,它产生准一矩形脉冲电压供磁控管之用。脉冲电压施加到磁控管的阴极,所以需要一

个负极性的脉冲。

早期的航空雷达系统, 它的脉冲电压为 12 千伏, 电流 12 安(144 瓩), 脉冲频率为每秒 1,000 次(pps), 脉冲宽度为 1 微秒^[1]。这是用一个由 13.5 千伏高压供电的高真空五极管来完成的, 其电路如图 1 所示。脉冲发生器电子管的阳极与磁控管负载之间的耦合电容 C_c 作为隔直流之用。在脉冲周期中, 开关管的控制栅极是正电位的, 以供给所需的输出电流, 开关管的阳极对阴极电压仅为 1.5 千伏。对于这种型式的脉冲发生器, 磁控管或其他高频发生器必须接近于脉冲发生器。

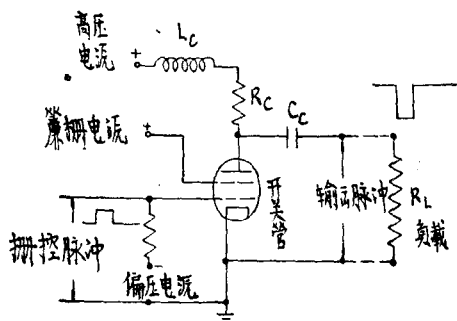


图 1 刚性管式脉冲装置线路图

脉冲变压器有几个功用, 包括供给负载不同电压, 转换电压信号(倒相), 电源和负载之间直流隔离, 以及负载与电源间阻抗的匹配, 以使电源能量(功率)最大地传送到负载。直到 1941 年, 没有一种变压器能完成这些功用和可以将施加于初级的 1 微秒矩形脉冲传输到次级, 并且其波形有相当的保真度。

要做到这一点, 铁芯材料需要有相当的磁饱和密度以及 1 微秒时脉冲导磁率在 500 以上。1940 年之前, 在商用上还没有能达到这些要求的铁芯磁性材料。

在 1942 年中期, 通过贝尔电话公司, 西屋电气公司和通用电气公司等实验室同样的但独立的工作, 获得了相当满意的材料。1941 年后期, 贝尔电话公司实验室制作了 0.03 毫米的铝-坡莫合金带绕的矩形铁芯^[2], 1942 年西屋用 0.07 毫米非取向 3.25% 硅钢

制成半环(C)形铁芯^[1]以及通用电气公司制成 0.07 毫米的 Si-Nicaloi(Sinimax)铁芯^[1]。

铝-坡莫合金具有在 $4B$ 为 10,000 高斯时约 3,500 的最高的 1 微秒脉冲导磁率, 但是用于不切割状态, 所以其线圈绕在铁芯心柱上, 作为一个环形铁芯, 并且要对磁通施加合适的偏置。而直到 1946 年左右, 在商用上才获得这种材料的铁芯。西屋公司用 0.07 毫米不取向合金迭片对接的 C 形铁芯, 在 $4B$ 为 8,000 时 1 微秒脉冲导磁率约为 200。

西屋和阿姆可钢铁公司^[3]其后的发展工作制备了 0.05 毫米和 0.025 毫米取向 3.25% 硅钢(Hypersil) C 形铁芯。在 $4B$ 为 10,000 高斯时, 0.05 毫米环形铁芯材料的 1 微秒有效脉冲导磁率约为 600。这种型式的铁芯首先为西屋公司所采用。

大约在采用 0.05 毫米 Hypersil 铁芯的时候, 通用电气公司研究实验室发展了一种 0.05、0.07 和 0.10 毫米的 3% Mo-47% Ni-50% Fe 的材料(Monimax)。这种磁性材料是由 Allegheny Ludlum 钢铁公司所制造, 并将冲成 UI 形的 0.07 和 0.10 毫米各种尺寸的材料投入商用。用对接 0.07 毫米 Monimax UI 迭片的铁芯, 在 $4B$ 为 10,000 高斯时其 1 微秒有效脉冲导磁率相等于 0.05 毫米 Hypersil 铁芯, 而在较低的 $4B$ 时略高一些($4B=8,000$ 高斯时为 800^[1])。

在脉冲变压器的发展中, 绝缘材料也是一个重要部门。贝尔电话公司实验室几乎独有地使用了变压器油和 Kraft 纸的绝缘制度, 而西屋和通用电气公司对航空系统中的 12 千伏装置使用了干式绝缘, 并在较高电压时使用了液式纸绝缘系统, 无溶剂清漆, 环氧树脂用以制造全密封干式绝缘系统。西屋发展了其 Fosterite 和通用电气公司发展了其 Permafil 以满足脉冲变压器的需要。通用电气公司使用 Formvar 带作为 2 千伏以下电压之用。在固化时, 该带会收缩, 所以它能减少但不能消除绝缘系统中的空隙。

脉冲变压器的效用就是可以允许雷达系统设计者把高频发射管放在离开脉冲发生器一个相当距离处。1941年11月,贝尔电话公司的人们操作一台刚性管式发射器,在该发射器中的刚性管式脉冲发生器端用一个降压PT,通过33.3米70欧的电缆,再用一个升压PT与发射器连接。几个月之后,MIT辐射实验室用作者设计的干式脉冲变压器进行了同样的试验。

脉冲变压器也使在低阻抗和低电压水平时可能发生脉冲能量,并且可以用一个PT来作高频发射管与脉冲发生器的匹配。在图2所示的系统中,脉冲能量起始贮藏于一延迟脉冲形成网络(PFN),而后利用一个气体放电型开关如火花隙或闸流管周期地在PT的初级放电。在脉冲间隔时期,PFN由直流电源重新储能。1942年1月,贝尔实验室证明,使用一个旋转火花隙开关通过33.3米电缆馈送给PT的初级获得成功。

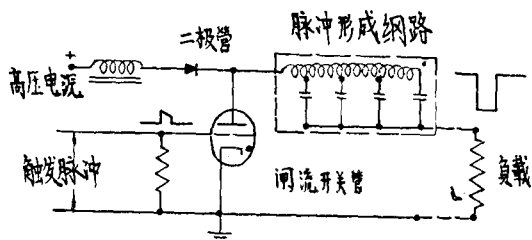


图2 长线型脉冲装置线路图

中功率脉冲变压器的发展使可能设计为刚性管式脉冲发生器用的延迟线控制型间隙振荡器-激发器线路^[1]。这种型式的线路是本作者早在1942年所发展^[4]。这可能消除讨厌的阴极输出激发线路,和由低功率闸流管开关的脉冲形成线路的不可靠性。

PT用适当的铁芯材料发展工作是与分析工作相伴随的。工作的结果使PT设计者作出达到线路设计者要求的设计。该工作的结果发现于许多已公布的技术文献、报告、书籍和专刊等参考文献中[1、5~11、4、19]。

2. 定义与术语

(1) 脉冲波形

图3说明一个脉冲电压,它具有通常用来指明脉冲形状几个部分的一些名称。有些相互交替使用的名称是,“前沿”作为脉冲波前,“后沿”作为脉冲尾部,“脉冲持续时间”作为脉冲宽度。

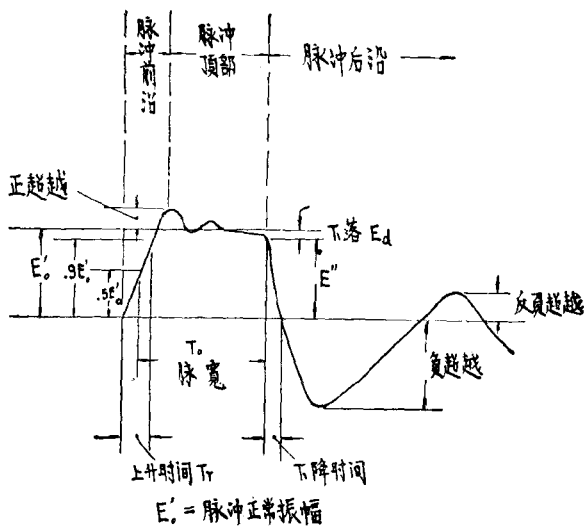


图3 波形定义

同样的定义使用于电流波形。使用下列关于脉冲波形的符号。

T_0 ——脉冲宽度(微秒)

T_r ——当脉冲源上升时间为零时,脉冲变压器输出电压的上升时间(微秒)。

E'_d ——输出(高压绕组)脉冲电压下落(伏)。

E'_0 ——额定(高压绕组)输出脉冲电压(伏)。

e'_0 ——瞬时(高压绕组)输出脉冲电压(伏)。

I'_d ——输出(高压绕组)脉冲电流下落(安)。

I'_0 ——额定(高压绕组)输出脉冲电流(安)。

(2) 线路参数

包括全部 PT 性能的基本线路参数是表征对初级供给电源的脉冲发生器特性, 以及表征与次级相连的负载特性的参数。这些恰当的参数和符号是:

E' ——反映在输出(次级)绕组上脉冲发生器的电压(伏)。

R_p ——脉冲发生器的内阻(相似于图 2 所示长线型脉冲发生器, R_p 是 PFN 的特性阻抗)(欧);

R'_p ——反映在输出(次级)绕组上脉冲发生器的内阻(欧)。

I_r ——复位电流峰值(安)。

PRF——脉冲重复频率(pps)。

恰当的负载参数和符号如下:

R_l ——变压器次级负载的等效电阻(静态阻抗)(欧)。

$R_{l,d}$ ——变压器负载的动态电阻(欧)。

C_l ——包括变压器衬管及所有绕组分布电容的总负载分路电容(微微法)。

E'_l ——二极管偏压或磁控管点火电压(伏)。

列于 IIA “脉冲波形”中的有些项目可以作为负载参数。

(3) 变压器参数

A_i ——铁芯净面积。

C_a ——次级(高压)绕组的有效分布电容(微微法)。

I'_m ——反映在次级绕组上的脉冲末端时初级峰值磁化电流(安)。

L'_l ——反映在次级绕组上的总漏感(微亨利)。

n ——初次级绕组匝数比, 即阻抗匹配参数, 见(5)。

N_p ——串联的初级绕组总匝数。

N_s ——串联的次级绕组总匝数。

R'_m ——反映在次级绕组上的等效铁芯损耗电阻。

(4) 恰当的磁性材料参数

对于在脉冲激励下的磁性材料的性能, 大多数发表的数据是根据 CGS 制, 所以这里使用这个制度。

B ——磁通密度(高斯)。

B_m ——最大可用磁通密度(高斯)。

B_p ——終了时间 T_0 时铁芯中的磁通密度(高斯)。

B_r ——剩余磁通密度(高斯)。

B_{rg} ——气隙式铁芯的剩余磁通密度(高斯)。

B_{rr} ——施加复位偏置磁化力后, 铁芯的剩余磁通密度(高斯)。

B_s ——饱和磁通密度(高斯)。

ΔB ——脉冲期间的磁通密度变化(高斯)。

H ——磁化力(奥)。

H_c ——矫顽力(奥)。

H'_c ——动态交流磁滞回线的视在矫顽力(奥)。

H_p ——在脉冲末端时的峰值脉冲磁化力(奥)。

H_r ——偏置磁化力峰值(奥)。

l_i ——磁路的平均长度(厘米)。

l_g ——气隙长度(厘米)。

μ_p ——在 T_0 时间内铁芯磁通密度变化 ΔB 时的有效脉冲导磁率(高斯/奥)。

大多数上列名称无需附加的解释。但是简单讨论一下有关名称, 将有助于把这些名称在电路中 PT 的运用联系起来。

由于施加电路的脉冲电压是单相的, ΔB 这个名称是重要的, 因为它代表在施加脉冲电压期时磁通密度的真实变化。对脉冲变压器基本方程式是

$$E'_0 = \frac{N_s \Delta B A_i \times 10^{-2}}{T_0} \quad (1)$$

根据铁芯的结构和磁性材料特性, 以及根据任何偏置磁化力的有效值 H_r , 在脉冲末端时铁芯中的真实磁通密度 B_p , 对于一个有

气隙的铁芯为

$$B_p = \Delta B + B_{r_g} \quad (2)$$

对于施加适当偏置磁化力, H_r 的铁芯, 则为

$$B_p = \Delta B - B_{rr} \quad (3)$$

方程式(3)表示在最大磁通密度 B_m 下, 偏置磁化力 H_r 的作用可以使铁芯材料的 ΔB 增加近一倍, 由于这种偏置磁化力, 在脉冲间隔内可以使经偏置的铁芯磁通接近 $-B_m$ (这样的运行将结合图5详述之)。

在动态(交流)磁滞回线中, 磁通密度从 $+B_m$ 变化到 $-B_m$ 的时间, 相当于获得磁通偏置的时间, 这样回线的视在矫顽力 H'_c 用来决定保证铁芯磁通适当偏置的 H_r 值。

铁芯所用的磁性材料, 其有效脉冲导磁

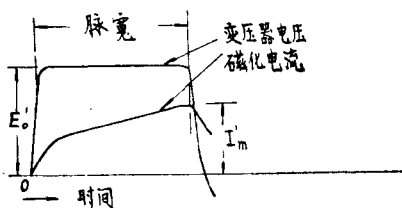


图4 在脉冲期间变压器电压和激励电流的典型波形

率 μ_p 对于设计脉冲变压器是重要的, 因为它决定PT的峰值激励电流 I_m 。图4指出在典型脉冲电压作用下的激励电流典型波形。图5示出0.05毫米取向硅钢的两个脉冲磁滞回线, 以及两个比较熟悉的静态(直流)磁滞回线。回线1代表无气隙铁芯。它是一个较小的回线, 回线上部比下部的磁通密度要高。

回线2仅是直流磁滞回线的上半部分, 表示铁芯有气隙后对回线的影响。短划线 $O-G$ 斜率是由铁芯的平均磁路长度 l_i 对气隙长度 l_g 比所确定。回线2是回线1向右切入斜率 $O-G$ 。必须注意 B_{r_g} 比 B_r 低多少 ($B_{r_g} = H_c l_i / l_g$)。

回线3表示有气隙铁芯的脉冲磁滞回线之一般形状, 其直流回线相似于回线2。 $B_{r_g}-A$ 线的斜率是在 ΔB 约为10,000高斯时的有效脉冲导磁率 μ_p 。回线4表示无气隙铁芯的脉冲磁滞回线的一般形状, 其直流回线与回线1相似。 $B_{rr}-A'$ 线的斜率是 ΔB 约为24,000高斯时的有效脉冲导磁率。回线左边的垂直线表示在恒定电流偏置的影响下使磁

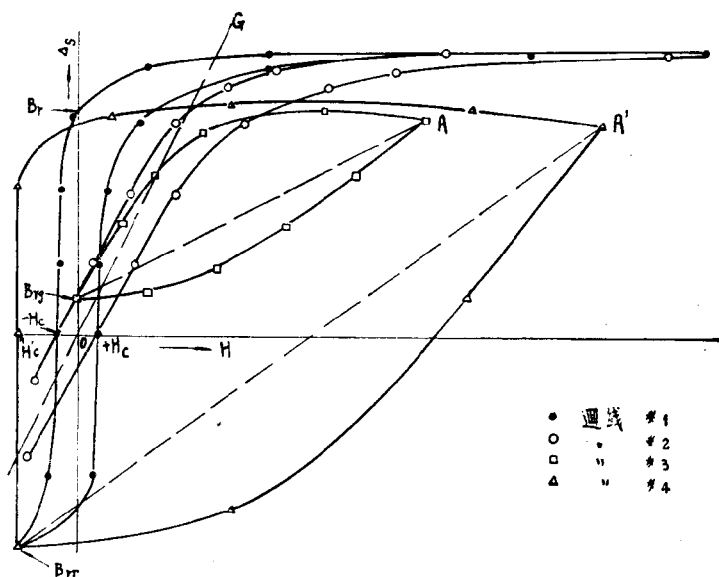


图5 典型直流磁滞回线和脉冲磁滞回线

回线1—0.05毫米取向Si-Fe的直流(静态)较小磁滞回线(浸渍环形铁芯); 回线2—回线1开气隙后铁芯的部分直流回线; 回线3—回线2中气隙式铁芯在2微秒, 10,000高斯时脉冲回线的近似形状; 回线4—回线1的环形铁芯在2微秒24,000高斯以及1.8奥直流磁场复位的脉冲磁滞回线的近似形状

通复位。在这期间内, dB/dt 是铁芯中涡流损耗的函数。脉冲磁滞回线的面积即每一脉冲的铁芯损耗值。回线 4 比回线 3 面积大得多, 这是由于较高的磁通变动与较高的涡流损耗相复合的原因(后者是相应于较高的 dB/dt 的)。

脉冲磁滞回线可用图 6 中所示的线路测量。电阻 R_1 和 R_2 必须是无感电阻。电阻 R_1 必须低到 $V_1/V < 0.01$ 。电阻 R_2 必须高到对脉冲发生器负载没有影响。积分电容器 C_2 与 R_2 配合的数值必须使试验所使用的脉冲宽度, 在脉冲末端时 $V_2/V < 0.01$ 。

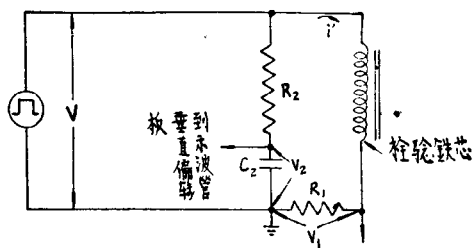


图 6 脉冲导磁率和脉冲磁滞回线的测量线路

激励电流波形和脉冲磁滞回线的形状示于图 4 和图 5, 这是取向硅钢的典型形状。对于高取向矩形直流磁滞回线的 50-50 Ni-Fe 合金, 以及矩形回线的 4-79 钼-坡莫合金的无气隙铁芯, 它们磁通的偏置是强制的。其电源波形和脉冲磁滞回线比图 4 和图 5 所示的更成矩形。

(5) 其他名称和记号

D——二极管。

Duty-cycle——占空因数, PRF 与 T_0 之乘积。

SCR——半导体开关元件(可控硅整流器)。

TWT——行波管。

3. 使用范围

脉冲变压器的使用遍及一个广泛的峰值功率和平均功率的范围。为了便于讨论, 从

较为任意的观点来分, 把它分成三个范围。中功率范围的脉冲功率是从 100 瓦到 2.5 千瓦, 以及高压绕组电压从 100 伏到 5 千伏。高于和低于这个范围的脉冲变压器被分类于强功率和低功率。

(1) 强功率脉冲变压器

强功率脉冲变压器中功率较低的通常用于干式绝缘结构。当高压绕组的脉冲电压定值在 5~20 千伏时, 根据特定使用要求, 可以用干式的也可以用湿式的绝缘系统。对于 20 千伏以上的脉冲电压, 通常还是用湿式绝缘系统。

除了某些强功率充氢闸流管栅控点火线路和保护火花隙的触发器以外, 差不多所有的强功率 PT 装置都用来把脉冲功率供给发生高能量微波高频功率的高真空电子管。这些高频功率发生器包括磁控管, 速调管以及行波管。

在这功率级范围内功率较低的装置包括航空和小型地面雷达系统用的充氢闸流管栅控点火、火花隙触发、输出变压器, 以及高功率真空开关管用的级间耦合驱动变压器。较高功率级的装置用于大型地面雷达系统和粒子加速器。

在实践中, 所有 PT 把主要的脉冲功率供送到微波电子管装置中, 在管的阴极上施加一个负脉冲。阴极加热功率是由低频功率系统供应, 经过 PT 上双线并绕次级绕组供给阴极(图 7)。这样可以使灯丝变压器次级绕组的绝缘不承受高压脉冲。如真空管灯丝

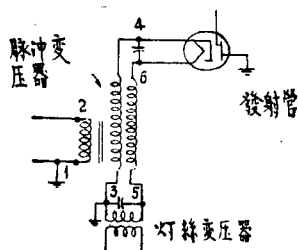


图 7 低频加热灯丝功率经脉冲变压器次级绕组馈电的脉冲变压器绕组之排列

电流太高,使超过 PT 次级绕组载流量时,在真空管座旁的绝缘支座上装置一个自耦变压器型的灯丝变压器来供给灯丝电流。这样,灯丝变压器初级电流较低,就可以通过 PT 次级双线并绕的绕组来供应。

(2) 中功率脉冲变压器

这类包括小型航空雷达系统的装置,驱动中功率和低功率真空开关管的级间变压器,栅极调制强功率行波管用栅极驱动器以及充氦闸流管栅控点火线路。

(3) 低功率脉冲变压器

这种功率级包含许多的应用。它包括用于脉冲型间隙振荡器、低能量级脉冲放大器中作为阻抗匹配变压器和倒相变压器,以及使可控硅点燃的固态触发线路的那些 PT。在计算机线路中有许多用途:有时用作阻抗匹配,有时用于普通形式的衰减和电路隔离。

4. 电子装置发展的影响 对脉冲变压器的要求

1945 年以来,脉冲变压器在尺寸和额定功率上两个方面都有发展。强功率微波管要求使用较高电压和功率的 PT。半导体装置及小型化控制和逻辑电路的发展要求小得多和较低功率级 PT 的发展。

(1) 强功率速调管

约在 1946 年开始的强功率速调管早期,需要一个由长线式脉冲发生器供给 225 千伏、40 兆瓦峰值功率、5 微秒的 PT。其后速调管的发展工作把峰值功率输出要求增加到 250 千伏和 60 兆瓦。最大平均输出额定功率为 80 千瓦。最近对速调管的发展工作可能需求实验用的脉冲变压器,定额为 300 千伏,脉冲功率输出为 100 兆瓦,以及最大平均功率为 100 千瓦。

(2) 行波管

许多 TWT 使用在阴极与整流子之间及阴极和外壳(接地)之间施加直流电压的所谓

飘移型的调制器。在这种类型运用情况下,为获得所希望的脉冲调制, TWT 的控制栅极是正向脉冲进行调制的。如果阴极对地电压仅几千伏,而脉冲宽度不大于几微秒,那末栅极驱动的脉冲变压器能够用以有效地隔离直流,因此脉冲驱动线路可以处在地电位。在这运行下,脉冲变压器很难设计得单独作为栅极的负载。偏压二极管削波电路常常与 PT 次级并联,以获得所需求的平顶脉冲。

有些 TWT 没有控制栅,它所需要的主脉冲功率可由长线型脉冲发生器供给。施加到阴极的负脉冲电压可达 60 千伏左右,但是脉冲电流可以小于 10 安。这样高的等效负载阻抗,使 PT 次级线圈需要抽头以降低阻抗,因而 PT 次级的电容负载增加,这样使得在设计 PT 及 PFN 时,还需要保证将二者组合起来满足所需求的上升时间和平顶脉冲。PT 的初级线圈和抽头的次级线圈的结构必须保证次级线圈的每一部分和整个初级线圈紧密地耦合起来。

有些 TWT 应用的 PRF 和占空因数很高。TWT 的占空因数与磁控管的最大值约 0.003 相比,可高到 0.01, PRF 可达 15,000/秒,脉冲宽度可达 30 微秒。这对于飘移型调制器的栅极驱动 PT 并不成问题,但对于阴极脉冲系统的 PT 却成为问题。如 PRF 高于 6,000 pps,铁芯发热将成为设计中的重要因素。

(3) 固态开关装置

固态装置如晶体管和半导体开关元件(可控硅整流器)可以用于低和中功率脉冲发生器线路,通过这种开关装置的电流其上升速率不是太高。因为这些装置之一,其操作的最大电压限于 2 千伏,因此为获得一定的峰值脉冲,发生器阻抗较真空管式脉冲发生器要低得多。在一定的额定脉冲功率下,PT 的初级绕组匝数较电子管式脉冲发生器少得多。

当脉冲功率需要几个固态开关并联时,

PT可以有几个相等的初级绕组,每一个绕组对应于一个脉冲发生器开关,并且同时点火。通过设计,这样应用的PT可以使每个开关均分负载。

用单结型晶体管点燃半导体开关元件(可控硅整流器)所需的小型低阻抗PT之设计并没有特殊问题,因为次级的波形要求并不苛刻。

在计算机中,PT常用来供给一定的脉冲电压和脉冲宽度以响应其初级中电流的步进作用。对于这些应用,设计程序应很大程度地依赖于与实际情况相似的激磁状态下所测定的铁芯性能。这种类型的PT用厚度小于0.025毫米的材料制成小型卷绕式环形铁芯,通常根据其最大磁通增量,而不是根据惯用的铁芯面积和额定占空因数来标定的^[12]。

5. 变压器参数和性能的关系

为简单起见,本文扼要地叙述升压式脉冲变压器运用于把负载与电源阻抗相匹配时的情况,更详细讨论可见其它论文^[1, 5, 11]。

(1) 等效电路

虽然可以根据频率范畴对脉冲变压器及它的组合电子线路进行分析,但通常根据时间范畴来分析,因为以时间为根据所得的资料对变压器和线路的设计更有用。

脉冲变压器及其组合的脉冲发生器和负载可用等效电路代表。

图8是脉冲发生器,升压式脉冲变压器

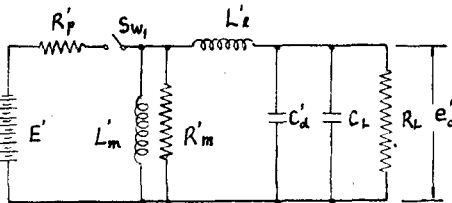


图8 脉冲发生器,升压式脉冲变压器及电阻负载的等效电路

及电阻负载的等效电路。脉冲发生器由电源电压 E' ,电阻 R'_p 及开关 SW_1 表示。假定开关根据脉冲宽度接通的时间是 T_0 ,随后按脉冲间隔时间断开,因为脉冲变压器的初级线圈和次级线圈间耦合得很紧,所以在简化的 L 线路中只包括磁化电感(L'_m)及漏感(L'_l)是适用于这里的分析的。由于脉冲变压器的线圈电阻很小,所以在等效电路中其损耗可以忽略不计,因此在脉冲变压器的等效电路中不包括串联电阻。

虽然电子管式高频发生器及高真空脉冲放大管控制栅的伏安特性呈非线性,但仍可作为二极管来看,图9是典型脉冲变压器负载的伏安特性。速调管及行波管特性是服从 $3/2$ 次方定律,为使分析简化,假定它们相当于一个和线性电阻串联的二极管。磁控管在达到点燃电压 E'_l 前起始电流很低,为便于分析可作为零,即相当于经偏置的二极管负载。

图10是脉冲发生器,升压式脉冲变压器及经偏置的二极管负载等效电路。设 E'_l 等

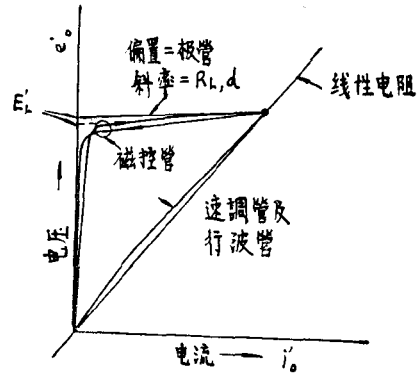


图9 脉冲变压器负载的典型伏安特性

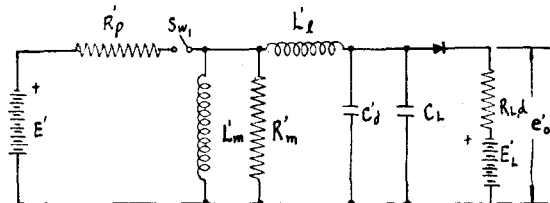


图10 脉冲发生器,升压式脉冲变压器,磁控管或经偏置的二极管负载的等效电路

于零,则负载电路即代表二极管和电阻负载,就是实际中的速调管或行波管负载。

(2) 简化的等效电路

因为大多数典型脉冲的上升时间 T_r 及下落时间较脉冲宽度 T_0 更短,就可以用简单的等效电路对脉冲的这三个部分的每一部分在线路中的运行进行分析,图 11、12 及 13 分别表示在脉冲前沿(上升时间),顶部,及后沿(脉冲尾)期间的简化等效电路。分析脉冲相应期间内简化等效电路的情况,就可以确定变压器参数对输出波形的影响,从而便于获得最好的脉冲特性,分析结果可用来说明脉冲变压器的参数,这种参数是变压器设计时所希望获得的。

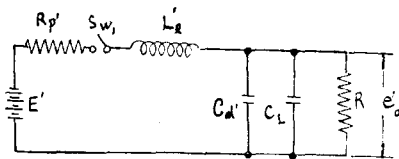


图 11 升压式脉冲变压器脉冲前沿的等效简化电路

对电阻负载 $R=R_L$ 。对经偏置的二极管负载 $R=\infty$

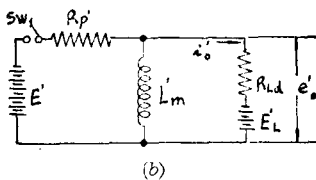
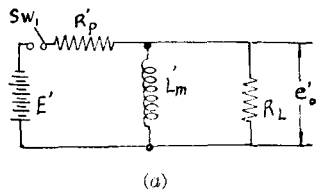


图 12 脉冲顶部简化等效电路

(a) 电阻负载; (b) 经偏置的二极管负载

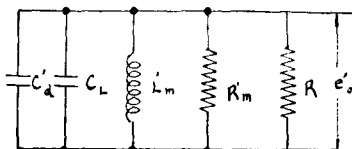


图 13 脉冲后沿简化等效电路

对电阻负载 $R=R_L$ 。对经偏置的二极管负载 $R=\infty$

(3) 等效电路分析结果概述

前面已指出过,这里的讨论及所附数据局限于配合线型脉冲发生器应用的升压式脉冲变压器,其负载为电阻或经偏置的二极管。

1. 脉冲前沿: 根据图 11 等效电路分析指出,要获得最短上升时间,但又不使电流和电压正超越增加,脉冲变压器的漏感 L_l' 与电容 $C_d'+C_L$ 总值及负载电阻 R_L 值的关系必须满足下列方程式

$$R_L = \frac{E_0'}{I_0'} = 10^3 \sqrt{\frac{L_l'}{C_d' + C_L}} \Omega \quad (4)$$

式中 L_l' 的单位是微亨, C_d' 及 C_L 是微微法。

这公式适用于所有型式的脉冲发生器及其负载。对于一个长线型脉冲发生器,为使脉冲功率能最大地输送到负载上,脉冲变压器的圈数比和脉冲发生器的内阻与负载电阻的关系应如下式

$$R_L' = R_p' = n^2 R_p \quad (5)$$

当脉冲变压器满足式(4)及(5)时,分析指出当脉冲源的上升时间为零,若负载是电阻时变压器次级的上升时间 T_r ,如下式所示^[10]。

$$T_r = 1.78 \times 10^{-3} L_l' (C_d' + C_L) \text{ 微秒} \quad (6)$$

同样条件下,若负载为经偏置的二极管,上升时间如下式所示^[10]。

$$T_r = 1.3 \times 10^{-3} L_l' (C_d' + C_L) \text{ 微秒} \quad (7)$$

2. 脉冲顶部: 图 12 指出变压器的磁化电感是影响脉冲顶部下落的参数,如电阻负载时 $I_m' \leq 0.2 I_0'$, 根据图 12(a) 分析,电压下落如下式所示^[10]。

$$\frac{E_d'}{E_0'} = 0.5 \frac{I_m'}{I_0'}$$

换言之,如激励电流峰值较负载电流小 20%, 则对于电阻负载电压及电流下降率是激励电流峰值的一半。

同样如图 12(b) 的分析,经偏置的二极管负载,在相同峰值激励电流及 $R_{L,d} \leq 0.1 R_p'$ 情况下,电压降很小,可以忽略不计,然而通常对运用磁控管负载的情况,电流下

降^[10]是

$$I_d \approx I_m'$$

因此电流降的百分数约等于激励电流峰值的百分数。

3. 脉冲下降时间和脉冲后沿: 图 13 示出该脉冲期间的等效电路。正如已公布的文献所述^[1, 5, 8, 11], 如果 L_m' 和 R_m' 是常数, 并能根据磁性铁芯材料性质而求得, 那么这个电路就很容易分析。但是铁芯材料磁化特征的非线性, 使 L_m' 和 R_m' 值亦呈非线性, 并且关系到铁芯中磁通密度及该期间的电压的振荡频率。

在下降时间负载电阻 R_L 常呈非线性, 结果使脉冲下降时间及脉冲后沿波形计算产生很大误差。脉冲变压器依据脉冲前沿和下落的要求而设计, 而且如果脉冲下降时间, 后摆, 及脉冲后沿振荡不能达到要求, 就必需采用校正线路, 校正脉冲输出波形这些线路的改进不在本文中讨论。

6. 磁性材料和脉冲变压器性能的关系

引言中已指出, 早期脉冲变压器铁芯是用薄片材料迭成, 这种材料的脉冲导磁率 μ_p 在 1 微秒和 ΔB 增量约 10,000 时约为 500。在 5-(3) 节中脉冲顶部及脉冲后沿的等效电路是有效的, 图 12 及图 13 分别示出等效激励电感 L_m' 值影响这两个部位的脉冲波形。图 13 示出等效铁芯损耗电阻影响脉冲后沿的波形。

由于磁性材料的性能对变压器线圈形状有影响, 因此这些性能也影响了脉冲的前沿, 在上升时间的方程式 (6) 及 (7) 中变压器的漏感 L_l 及分布电容 C_d' 两个参数和线圈形及绕线方式有关。 L_l 和 C_d' 的乘积 ($L \cdot C$ 乘积) 代表脉冲变压器的品质因数, 这数值用以估计绕线方式, 线圈形状和布置的影响, 最好的设计不但要使 $L \cdot C$ 乘积最小, 还要使 $L \cdot C$ 的比

值能满足方程式 (4) 要求。

具有高饱和磁通密度, 高脉冲导磁率和低铁损的铁芯材料可用以制造低 LC 乘积的中功率和强功率脉冲变压器。 L_l 及 C_d' 都和线圈的平均长度成正比, 在其他条件相等下, 当绕组平均长度接近于铁芯截面周围尺寸时, LC 乘积就接近于与铁芯材料最大磁感应增值 ΔB 并成正比。

根据脉冲下降要求, 脉冲导磁率 μ_p 决定变压器次级绕组的最小圈数, 以在一定平均磁路长度下, 达到满足下降要求的 L_m' 值。因为 L_l 与 N_s^2 是成正比的, 因此就需要有更高的 μ_p 值, 这样不但可以充分利用铁芯材料的 ΔB , 还可使次级圈数最少。

脉冲重复频率增加以及需要脉冲顶部迅速下落时, 特别在占空因数高的脉冲宽度下, 在脉冲状态下应用的磁性材料的铁损就成为更重要的问题, 获得目标数据的雷达, 其脉冲重复频率为 10,000~15,000 pps, 这种场合如用 0.025 毫米厚晶粒取向硅钢已因铁损太高而不能满足要求。如采取有效散热方法使脉冲变压器铁芯温度保持在 85°C 以下, 超坡莫合金是适合高脉冲重复频率应用的最好材料。超坡莫合金和其他相同厚度的各种铁芯材料比较, 它的脉冲铁损最低, 脉冲导磁率最高。适当的选取复位磁化力 H_r 后, 超坡莫合金制造的卷绕铁芯可以在 ΔB 为 10,000 高斯下使用。并没有严重的饱和影响。

用矩形磁滞回线的 4-79 钼-镍-铁合金 (钼-坡莫合金) 制成的卷绕铁芯, 可以在 125°C 和 ΔB 为 10,000 高斯时应用。虽然在 1 微秒脉冲和相同情况下, 0.025 毫米厚 4-79 钼坡莫合金铁芯损耗较超坡莫合金高 20% 左右。

7. 激励线路和铁芯性能的关系

在选择脉冲变压器铁芯型式时, 必需考

馈送到脉冲变压器初级的脉冲发生器线路的特性。如2-(4)节中指出的:铁芯材料可利用的 ΔB 值决定于铁芯是否有气隙,及在间隔时期是否采用一定的偏置磁化力(H_r)。

(1) 低及零值偏置电流线路

假定脉冲变压器初级线圈直接和开关管屏极回路串联,初级线圈中脉冲电流是单相的。假如不采用偏置磁化力,为这种电路而设计的脉冲变压器必需使用气隙式铁芯,其气隙长度必须使剩磁 B_{r0} 很低,以获得如公式(2)计算所得的 ΔB 值。

即使初级线圈按图1和图2连接,初级线圈内直流平均电流等于零,如脉冲间隔时期电流不足以使铁芯偏置磁化;就需要使用气隙式铁芯。用晶粒取向硅钢制造的铁芯所需要的偏置磁化力,较大多数脉冲发生器系统所能供给的还要大。

(2) 适应的偏置电流线路

铁芯材料如超坡莫,4-79 钼坡莫合金,及晶粒取向50-50镍铁合金(Deltamax, Orthonol, Orthonik, Squaremu 49等)在复位期间内,铁芯磁通改变率很低时仍有较高的导磁率。用这类材料制造的无气隙式铁芯脉冲变压器,可用图1所示的电容器 C_r 或图2中脉冲形成回路中的电容器中的放电电流,进行适当的偏置。采用这种电流使铁芯复位磁化时,脉冲变压器的设计就必需充分地了解放电电流的幅值及持续时间。如果电容器供给放电电流所形成的 H_r 不能使铁芯完全偏置磁化,就需要增强偏置磁化力,另外用一个低压直流电源通过线性电感接至变压器初级绕组供给偏置电流线路中串接电感后,可以避免初级绕组与直流电源间的耦合作用。

通过初级或第三绕组用独立电源供应偏置磁化力后,就可以在设计中采用无气隙式铁芯,这种铁芯不需要脉冲发生器对初级供应任何偏置电流。

8. 磁性材料发展的贡献

在第6节中已叙述了磁性材料对脉冲变压器特性所起的重要作用。本节中将讨论1945年以来在磁性材料和铁芯方面,对脉冲变压器所作的贡献。

4-79钼坡莫合金具有较高矩形度的磁滞回线,使这种高脉冲导磁率材料有可能用在高饱和磁通密度,和相应的高 ΔB 值下而无需直流复位电流来使 $-B_r$ 值维持在高水平上。当脉冲形成回路放电电流足以使铁芯磁通偏置时,这种运用方式适用于任何一种用高矩形 B_r/B_m 比材料制造的无气隙式铁芯。

晶粒取向50-50镍铁合金的发展,提供了一种各种性能良好的低损耗磁性材料,这种合金的磁饱和值 B_s 达15,000高斯,磁滞回线矩形度很高,矩形比 B_r/B_m 超过0.95,它的直流矫顽力小于0.15奥,0.05毫米厚的材料在6,000周时的矫顽力小于0.5奥。这种材料具有双取向性能,即与轧制方向平行或成90°的方向都是易磁化向(“立方”结构)。0.075毫米以上厚度的合金带在最后高温退火前,可以用合适的冲模冲成需要形状,用冲成的搭接式U形(DU或双U)迭片装配成的铁芯,其性能与用同样厚度材料制成的环形铁芯很近似。

适当采用偏置后,用高饱和及高脉冲导磁率 μ_p (在 ΔB 20,000高斯及1微秒脉冲时约为2,500,在 $\Delta B=25,000$ 高斯及10微秒脉冲时约为14,000)的晶粒取向50-50镍铁合金作铁芯材料时,可设计出短脉冲快速上升时间的脉冲变压器,这种变压器也可以在长脉冲低下降场合下应用,材料的 ΔB 值高了以后就可以使铁芯面积减小,从而有可能得到低 LC 乘积的线圈以设计出一种200匝脉冲功率的脉冲变压器,其上升时间 T_r 小于0.2微秒,额定最大脉冲宽度为10微秒。这种变压器铁芯的损耗很低,如果铁芯很好冷却,

可以在占空因数为 0.125 毫米情况下使用。

在占空因数及脉冲宽度允许用 0.075 毫米或更厚的迭片时, 用双取向 50-50 镍铁合金或晶粒取向 Monimax^[14] DU 形迭片装成的铁芯, 可以达到无气隙式铁芯的磁特性。用 DU 形迭片装配成的脉冲变压器铁芯装配线圈时, 和一般方法相同, 即先在线圈管上绕好线圈, 然后将铁芯插入线圈管中去。至于用薄迭片迭成的环形铁芯只能在环上穿绕线圈和绝缘材料。

已经对用晶粒取向硅钢 (Silectron, Hypersil, Magnesil, Supersil 等) 制造的大型铁芯的脉冲特性作了一些改进^[14], 所以施加偏置后以 0.05 毫米厚材料并浸渍过的环形铁芯在脉冲宽度为 6.5 微秒及 ΔB 为 25,000 高斯时, 脉冲导磁率可达 5,000, 这数值已相等于在同样脉冲宽度及 ΔB 下, 50-50 晶粒取向镍铁合金的数据。

根据用 Supersil 制造铁芯未公开数据表明, 在最佳直流偏置下半环形铁芯在 ΔB 为 22,000 高斯及 $T_0 = 6.5$ 微秒时, 其脉冲导磁率为 5,500, 加利福尼亚州斯坦福直线加速器中心站 (Palo Alto 附近) 按装的 2 哩长直线加速器, 所用 250 千伏, 3.5 微秒, 64 兆瓦的脉冲变压器, 就是使用直流偏置的大型半环型铁芯。变压器的铁耗在 ΔB 约 22,000 高斯时很低, 以致在 360 pps 运用时只需要自然对流的油冷系统就已可以。

脉冲变压器铁芯损失是铁芯体积的函数, 而激励电流是平均磁路长度的函数。一台 360 千伏安脉冲变压器共用三个回环组成铁芯。在正常脉冲电压下, 这种强功率脉冲变压器线圈的圈间电压超过 2,000 伏, 设计中将铁芯分成数块, 并且分隔开来, 可减少线圈与铁芯间脉冲电压。

软磁铁氧体材料的发展对低功率短脉冲宽度的脉冲变压器作出了贡献, 高质量铁氧体有很高的脉冲导磁率, 低的损耗值, 因此可用以设计脉冲率为 10^6 pps 的低功率短脉

冲变压器。

9. 新型脉冲变压器对磁性材料未来发展的要求

第 8 节已讨论过过去由于磁性材料的发展使脉冲变压器性能有了改进。本节将讨论如何改进磁性材料性能, 使脉冲变压器性能可以进一步提高。

(1) 高磁通密度低损耗材料

即使在磁通变动时脉冲导磁率仍然相同, 但在脉冲激励下铁芯材料每磅每脉冲的损耗就愈高。当占空因数达 0.001 或更高时, 目前应用磁性材料的铁损就较大, 在脉冲激励及高 ΔB 值下应用往往需要采用特殊冷却系统^[14]进行冷却。

目前最好的晶粒取向硅钢, 在适当的铁芯复位磁化及有效冷却下, ΔB 可使用到高达 30,000 高斯^[14]。0.025 毫米的材料, 其低频磁性能较 0.1 毫米的差, 其 H_c 较高而矩形比较低, 如对 0.025 毫米的材料低频磁性能加以改进, 就可使脉冲损耗减少, 并只需要较少的复位磁化力。

目前在试验室中已制造出具有良好低频性能的晶粒取向薄硅钢片, 但是目前晶粒取向硅钢的生产过程还不完善, 因此还不能经济地生产这种带材。

Supermendur (49Co-2V-49Fe) 是一种高饱和材料, 它的 ΔB 可用到高达 40,000 高斯^[14]。这种材料的直流矫顽力及矩形比虽然和晶粒取向的 50-50 镍铁合金相似, 但是它在高频时损耗剧烈增加, 例如 0.01 毫米 Othonol 的直流矫顽力是 0.15 奥, 而在 400 赫正弦磁通下矫顽力随着频率增加而增加到 0.25 奥, 但 0.10 毫米 Supermendur 的直流矫顽力是 0.18 奥, 而在 400 赫正弦磁通下矫顽力增加到 0.9 奥, 这两种材料在高频情况下损耗不同的部分原因是: Supermendur 的电阻率较低, 仅为 26 微欧·厘米, 而 Othonol

表 1

材 料 类 型	商 品 名 称	最大磁通密度 (G)		降低百分率
		25°C	225°C	
79Ni-4Mo-17Fe	钼-坡莫合金, 4-79 坡莫合金, HyMu 80	7500	5900	23
50Ni-50Fe	Deltamax, Orthonol, Hipernik V, 49 Square Mu	15000	12500	17
3% Si-Fe	Silectron, Hypersil, Magnesil, Supersil, Microsil	17400	15800	9
49Co-49Fe-2V	Supermendur	21300	19100	10

的电阻率较高为 45 微欧·厘米。另外一部分原因是: Supermendur 是一种经过磁场热处理的磁畴取向材料。磁场热处理后磁畴取向的 65-坡莫合金也发现有同样效果, Deltamax (Orthonol) 经磁场热处理后, 其直流性能也有改进^[17]。

在 ΔB 为 24,000 时 0.05 毫米厚的 Supermendur 在 $T_0=6.5$ 微秒时的脉冲导磁率与 0.05 毫米厚的 Hypersil 相似, 但铁芯损耗要低 35~40%^[14]。实际上强功率脉冲变压器如使用 Supermendur 虽然可以使损耗降低, 但价格太高。这种合金可能作一些改进, 改进后它的磁饱和值可能略有降低, 在 ΔB 为 30,000 高斯以下时, 0.025 毫米及 0.05 毫米厚的材料的脉冲性能较同厚度的 Silectron 及 Orthonol 在 24,000 高斯时的性能还要好。这种材料价格虽较 Silectron 及 Orthonol 高, 但可用在航空方面, 因为航空方面首要考虑的是小体积和高效率 (低损耗)。

(2) 高温材料

新的绝缘材料, 不论固体或液体状态的使用温度都可达到 200°C 以上, 当每立方吋的铁芯损耗增加时, 铁芯温度通常较线圈温度更高, 如果允许高的温度差, 就可以简单的将铁芯中热量耗散到变压器油箱中, 某些情况下铁芯温度可达 225°C。

所有磁性材料在温度增高时, 它的磁饱和值都会降低, 表 1 是温度和 B_m 间关系, 该磁通密度是在约为各种材料矫顽力 20 倍大小的磁场下的磁通密度。

79 镍合金在温度升高时, 磁饱和值降低最多, 如果能发展一种合金, 其矩形比及脉冲特性与 4-79 钼坡莫合金相仿, 但在 250°C 时, B_m 值仍大于 10,000 高斯, 对脉冲变压器发展将是一个很大的贡献。当要求高占空因数时, 这种材料特别适用于制造强功率级中较小功率的脉冲变压器。

译自 «I.E.E.E. Trans on Magnetics» Vol.
Mag. 7, No. 1,