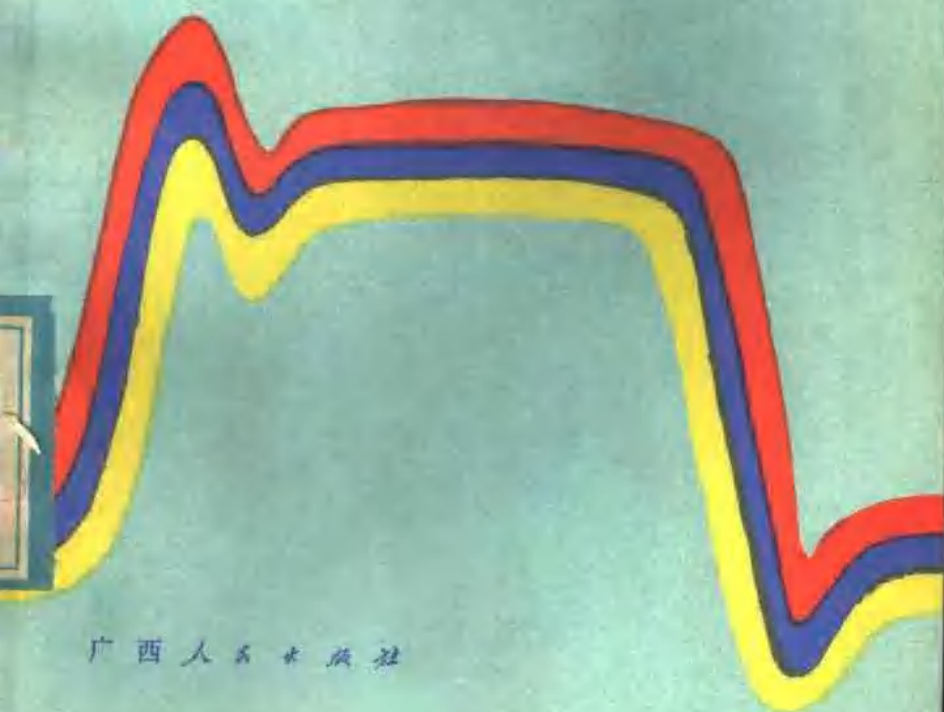


刘进友 译
张祥英 校

脉冲变压器计算



广西人民出版社

脉冲变压器计算

刘进友 译
张祥英 校

广西人民出版社

脉冲变压器计算

刘进友 译 张祥英 校

☆

广西人民出版社出版

(南宁市河堤路14号)

广西新华书店发行 广西民族印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/32 4.375印张 90千字

1984年9月第1版 1984年9月第1次印刷

印 数 1—49300册

书号: 15113·103 定价: 0.40元

译者的话

有关脉冲变压器设计的方法，国内外已有许多文献作了介绍。可是，已有的设计方法大部分只从脉冲波形出发，对于如何获得脉冲变压器的最高效率和最小体积等问题，则很少予以考虑。

本书所提供的设计计算为结构参数法，其特点之一是在综合考虑电气、能量和结构特点的基础上，详加论述和验证。因此，用该计算方法设计制造出的脉冲变压器，波形失真小、体积小、重量轻、效率高。此外，该设计方法，既适合于大功率脉冲变压器，也适用于晶体管电路中的小功率脉冲变压器。

本书的特点之二，是在理论阐述的基础上，对于各种电路使用的脉冲变压器进行实例计算，为读者提供了有力的使用说明，便于掌握。

本书的特点之三，是所提供的计算方法不同于一般脉冲变压器计算，既重视理论推导，又不忽视经验数据。故可以纵横验证，简便易行，结果确切可靠。

在翻译中，对原文中的错误作了订正。由于译者水平有限，译文谬误之处在所难免，衷心恳请广大读者批评指正。

本书在翻译过程中，承蒙杨煊华和胡梅松二位工程师在技术上作了指导，并对有关公式进行验证。在此一并致谢。

译者

一九八二年十月

绪 论

在无线电探测设备中，实验物理学、量子电子学以及改进工艺技术等领域，脉冲变压器已被广泛的采用。

脉冲变压器可用来变换脉冲电压或电流，改变脉冲极性、阻抗匹配、隔离电位和组成反馈等。同时脉冲变压器也可以被视为一个元件，例如作为微分变压器。

在某些脉冲设备中不能没有脉冲变压器，这里特别强调的是高压脉冲设备。如果产生脉冲的电源电压达不到整流元件（电子管、闸流管、可控硅）或振荡器的电抗元件（电容器、电感器）所需的电压，则必须利用脉冲变压器来提高工作电压。虽然采用级联放大电路也可以提高电压，但是由于整流元件在电路中电位不同，因而使控制工作状态的调整复杂化。

在某些设备中，从技术和经济观点出发，脉冲变压器和其它判定电路相比，采用前者是理想的。例如，要改变脉冲发生器的脉冲极性，可用改变电源的极性或改变储能元件和脉冲发生器的接线法来实现。但是，这样做并不方便，或极本不可能。如果利用脉冲变压器来变换脉冲极性，则方便易行。

在许多脉冲设备中，微小功率脉冲变压器可作为辅助元件，用于控制电路、自动化电路和保护电路中。

市售脉冲变压器（专用小型和特种脉冲变压器除外）的数值数量级有：电压从1伏到几百千伏，电流从零点几安培到十几千安培，功率从1瓦到几百兆瓦，脉冲宽度从零点几

微秒到几百、几千微秒，脉冲重复频率从1赫兹到几十千赫兹。

使用脉冲变压器，总会引起脉冲波形的失真。这是由于变压器的漏感、分布电容和磁化电感所致；而变换脉冲时，又会有部分能量损失，这是由于铁芯的铁损和线圈的铜损造成的。采用脉冲变压器还会增大脉冲设备的尺寸和重量。

所以，使用脉冲变压器，既要考虑采用元件的工作条件，又须考虑输出脉冲的波形、效率、尺寸、重量以及其经济效果。

对于脉冲变压器最基本的要求，是要求其变换脉冲波形时畸变最小。为此，只要对脉冲变压器的效率和体积加以限制，就可满足上述要求。不过，问题不如此简单，须知脉冲变压器的设计与所组装的脉冲设备有关。

矩形脉冲具有陡峭的前沿和极平坦的平顶，所以脉冲变压器广泛采用矩形脉冲变换。因此，研究脉冲前沿持续时间和上升特性及平顶降落是必要的。设要求矩形脉冲变换时畸变最小，则脉冲前沿持续时间应大大地小于脉冲宽度。因此，须研究变换脉冲前沿和平顶降的工作过程。使用脉冲变压器等效电路图，可以提供等效电路参数和结构参数间的联系，并寻求获得可满足对脉冲前沿和平顶降要求的表达式。

脉冲变压器的工作特点是工作状态的瞬时性以及其铁芯和线圈工作的特殊性。其高速变化的磁通量使脉冲变压器铁芯涡流增大和能量大量损耗。消除影响脉冲瞬时性的因素，应考虑漏感和线圈里的分布电容的处理。因为该分布电容会影响脉冲前沿特性和脉冲变压器能量特性。在线圈导线的有效截面确定之后，如为窄脉冲，还应考虑计算趋肤效应。对于单极性脉冲，必须估计能否完全利用磁性材料的磁特性。

脉冲变压器用途各异，但其铁芯和线圈的工作过程却具有同一性。因此，对脉冲变压器工作过程的计算，可先求得一个近似的共同结果，即可建立脉冲变压器的等效电路，从而建立其等效电路参数与结构参数的关系式，确定计算方法，以获得满足设计要求的结果。

如何处理脉冲变压器等效电路参数和结构参数之间复杂而又相互矛盾的关系，是脉冲变压器设计计算的难点。设分布电容和漏感非常小时，变换的脉冲波形畸变也最小。如果减小分布电容和漏感，就必须减少脉冲变压器线圈匝数和减小铁芯截面积。同时，要求变换的脉冲具有最小的平顶降，则又必须加大磁化电感。而加大磁化电感，又应加大线圈匝数和铁芯截面积来实现。如此，将会使漏感加大，影响脉冲波形，脉冲变压器的重量和体积也随之增加。

设要减小脉冲变压器的重量和体积，则必须减少线圈匝数和减小铁芯截面积。这样又会导致脉冲平顶降增大和涡流损耗增加。

在设计计算中只能以综合折衷方法解决，对其取舍应以所要求参数的重要程度来决定。

铁芯材料特性的选择和绝缘材料的使用是否理想，是计算精确性的关键。如要提高计算的精确性，必不可忽视实验数据，须知，这些数据是由给定的脉冲变压器工作状态获得的。

本书论述的脉冲变压器计算方法为结构参数法。书中以不同的脉冲功率、宽度、重复频率以及工作于不同的脉冲设备，如：电子管脉冲发生器、带仿真线的脉冲发生器、半导体器件脉冲发生器等电路中的脉冲变压器为计算实例，以供参考。

目 录

绪 论

第一章	脉冲变压器等效电路参数	(1)
1—1	脉冲变压器等效电路.....	(1)
1—2	脉冲序列对铁芯的磁化.....	(4)
1—3	涡流损耗计算.....	(8)
1—4	脉冲变压器线圈分布电容.....	(14)
1—5	脉冲变压器线圈的漏感.....	(20)
1—6	脉冲变压器等效电路各参数间的 关系.....	(24)
第二章	脉冲变压器的电气性能、能量特性 和结构特性	(27)
2—1	脉冲前沿的建立.....	(27)
2—2	脉冲前沿特性的保证条件.....	(32)
2—3	脉冲顶部下降.....	(34)
2—4	脉冲后沿和反冲电压.....	(35)
2—5	能量传输系数.....	(37)
2—6	结构参数最佳值的选择.....	(44)
2—7	脉冲变压器的磁通密度增量和结构 特性的选择.....	(47)

第三章	脉冲变压器的计算	(51)
3—1	用于计算的原始数据.....	(51)
3—2	脉冲变压器线圈接线和绝缘.....	(52)
3—3	线圈导线截面积的确定.....	(56)
3—4	磁通密度增量的选取和有效导磁率系数的确定.....	(57)
3—5	铁芯截面积和线圈匝数的确定.....	(61)
3—6	线圈高度及磁路长度的确定.....	(64)
3—7	损耗及效率的计算.....	(65)
3—8	脉冲变压器计算程序.....	(68)
第四章	脉冲变压器计算实例	(72)
4—1	具有仿真线脉冲发生器电路中的脉冲变压器计算.....	(72)
4—2	电子管脉冲发生器的脉冲变压器计算.....	(85)
4—3	大功率脉冲闸流管ТГН1—2000/35线路的脉冲变压器计算.....	(95)
4—4	采用可控硅控制电路的脉冲变压器计算.....	(106)
附 录		(121)
参考文献		(125)

第一章 脉冲变压器等 效电路参数

1—1 脉冲变压器等效电路

脉冲变压器的电气性能和能量特性，是以其近似等效电路为基础进行计算的。等效电路应具备如下条件：

1. 必须考虑脉冲变压器最重要的电磁过程和保证设计中特性计算的精确性；

2. 使用较低阶的方程式，简明、扼要地描述其最主要的特性参数和结构数据及其它所需要的数据。

上述条件相互矛盾。要实现第一个条件，就需要很复杂的电路。而实现第二个条件，则又嫌分析不精确。

以下各章表明，用于计算的几个最主要的结构数据和计算所得的最佳值，虽有一定偏差，但对变压器电气性能和能量特性影响不大。此外，在实际应用中，结构尺寸和计算值仍会有某些出入。

因此，设计脉冲变压器，采用复杂的等效电路来提高某些数据的精确性，其意义不大。

设计经验与各种等效电路计算结果比较表明，采用简化等效电路计算也可满足工程需要的精度。对于最主要的参数可归入次级电路计算，以便于分析。

线圈导线的感应过程和铜耗用T型等效电路计算（如图

1—1 a), 该等效电路由两个绕组变压器的方程给出。

电路参数如下:

L_m ——变压器线圈励磁电感。应考虑加电压于初级线圈时, 铁芯互感主磁通量的能量贮存及磁芯中的磁通量与初级线圈励磁电流的关系;

L_{s1} 、 L_{s2} ——线圈漏感。它和漏磁通量中贮存的能量大小有关;

R_1 、 R_2 ——线圈导线有效电阻。应考虑负载电流通过导线时的损耗;

R_B ——等效电阻。应考虑铁芯磁滞作用和涡流作用造成的能量损耗。

T型等效电路的参数是将脉冲变压器的主要参数简化集中于任一个线圈的电压给出的。这样导出的参数, 对初、次级线圈都适用。

图 1—1 所示为脉冲变压器初级线圈所有的符号, 对于次级线圈的各个参数为

$$U_1' = nU_1;$$

$$I_1' = I_1/n;$$

$$R_1' = n^2 R_1;$$

$$L_{s1}' = n^2 L_{s1}, \quad (1-1)$$

式中 $n = U_2/U_1$ ——变压比系数。

同样, 次级线圈的参数转换为初级线圈的参数时, 只须将 (1—1) 式脚注改变, 而变压比系数为 $n' = U_1/U_2$ 。

除脉冲变压器磁场贮存能量外, 还必须考虑线圈与铁芯及线圈间电场能量的贮存。计算这些能量可以引入三个电容来构成 Π 型结构: C_1 ——初级线圈电容, C_2 ——次级线圈电容, C_{12} ——线圈间电容。

图1—16所示脉冲变压器等效电路必须用四阶方程描述，非一般方程所能求得的。然而在未明显出现误差时可以简化电路，不过要注意如下条件：

1. 通常，磁化电流是负载电流的一很小部分，故可忽略它对漏磁通量的影响。这就把T型电路从电感分路起转为Γ型电路；

2. 由于电能和电压平方成正比，所以高压线圈为贮存电能的主要部分。因此，Π型电路电容元件可用一个等效电容代替，与高压线圈并联；

3. 脉冲变压器线圈匝数少，在计算最主要的电气性能时，线圈电阻值可以不计，假定 $R_1 = R_2 = 0$ 。但在计算损耗时，线圈的电阻必须计入。

根据上述简化法获得的升压脉冲变压器等效电路如图1—2a，降压脉冲变压器等效电路如图1—2б。

以下各章将以这些电路为基础，给出脉冲变压器电气性能的计算。其目的在于研究脉冲磁化导磁体的过程以及给出电、磁能量贮存的表达式，并据此确定脉冲变压器等效电路元件参数。

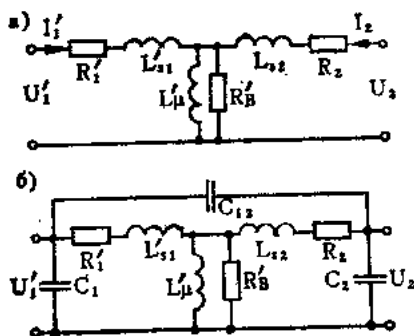


图1—1

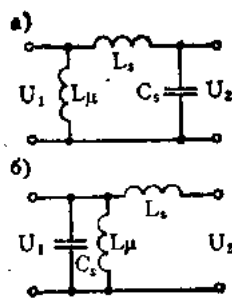


图1—2

1—2 脉冲序列对铁芯的磁化

脉冲变压器铁芯的截面为 S ，当幅度为 U 、宽度为 τ 的矩形脉冲电压施加到线圈上时，铁芯被均匀磁化，线圈中的电动势为

$$U = w \frac{d\Phi}{dt} = w S \frac{dB}{dt}, \quad (1-2)$$

式中 w ——线圈匝数； $\Phi = BS$ ——铁芯磁通量； B ——铁芯磁通密度平均值。

引进磁通密度的平均值与铁芯片截面上的磁通密度的实际分布不均匀性有关。从(1-2)式可知，磁通密度的变化以等速变化进行，即

$$\frac{dB}{dt} = \frac{U}{wS}. \quad (1-3)$$

假定磁通密度初始值为 $B(0) = B_0$ (取 $t = 0$)，当 $t > 0$ 时，磁通密度以线性规律增长，即

$$B_0 + \frac{U}{wS} t.$$

$t = \tau$ 时，即达到脉冲后沿，磁通密度达到最大值。

磁通密度增量（磁通密度初始值和最终值之差）以 $\Delta B = B(\tau) - B_0$ 表示。脉冲变压器变换矩形脉冲时，其中的磁感应定律为

$$\Delta B = \frac{U\tau}{wS}. \quad (1-4)$$

如果能忽略涡流影响，则磁场强度 H 的平均值取决于导磁体材料的磁性。变压器线圈内的磁化电流 i_m 的增长与 H 成正比。在特性曲线的直线段内磁场强度 H 、磁化电流 i_m 和磁

通密度 B 都以线性变化。

脉冲电压作用结束后 ($t > \tau$)，磁化电流依照脉冲变压器电路参数确定的规律下降，铁芯内的磁场和磁感应也相应减弱，此时线圈内产生反极性电压。

观察单极性脉冲序列磁化铁芯材料的静态过程（即涡流忽略不计），该脉冲序列的占空系数又足以使磁化电流在后一个脉冲进入前下降为零。

作用于脉冲变压器线圈上的脉冲电压的幅度和宽度不变时，铁芯的磁化过程在磁通密度增量为常数 ($\Delta B = \text{常数}$) 条件下进行。

假定铁芯无剩磁，脉冲电压连续加于线圈上时，磁化过程如图1—3所示。第一个脉冲作用时，工作点沿磁化原始曲线由起点到点1，形成磁通密度增量 ΔB 。当脉冲作用结束后，磁化电流消失，工作点沿磁滞回线（沿箭头所示方向）降

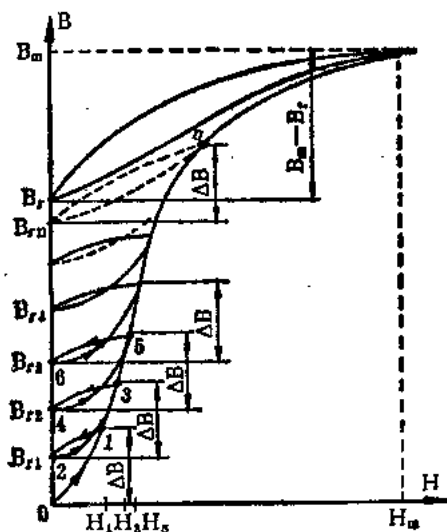


图1—3

到点2,该点上剩余磁通密度为 B_{r1} 。当第二个脉冲作用时,工作点由点2转移到点3。此时重新达到所需磁通密度增量 ΔB 。脉冲结束后,工作点移到点4,剩余磁通密度为 B_{r2} 。

脉冲序列作用达到稳定状态后,磁化过程沿原始曲线上某一固定局部磁滞回线 n 点重复,这时剩余磁通密度为 B_{rn} 。磁通密度变化不论磁场强度增长或降低,其 ΔB 值恒等。显然,固定的局部磁滞回线的位置,对某种材料来说取决于 ΔB 值的大小。如果 ΔB 足够大,则局部磁滞回线的最低点位于最大局部磁滞回线的剩余磁通密度点 B_r 。

用 ΔH 表示磁场强度增量,它在固定局部磁滞回线上与磁通密度增量 ΔB 相对应,即关系式为 $\Delta B = f(\Delta H)$ 。在直流状态时,该关系式不能成立。上述关系式称为脉冲静态特性。脉冲静态磁化系数称为平均导磁率,由如下比式确定

$$\mu_{\Delta} = \Delta B / \Delta H. \quad (1-5)$$

从静态脉冲磁化曲线可知,由于剩磁感应影响,存在的最大允许 ΔB 和脉冲导磁率值(用于单极性脉冲磁化变压器时)低于对称交变磁化变压器所采用的值。

需要 ΔB 和 μ_{Δ} 为高数值的场合(如高压脉冲变压器),可选用下列方法改善铁芯材料的磁性:(1)使用有空气隙的铁芯;(2)采用反磁场。

增加铁芯空气隙以降低剩余磁感,使磁感增量接近饱和磁感 B_m ,如图1—4所示。在此情况下,脉冲导磁率的平均值也随之改变。

假定 l_g 为空气隙长度,磁路总长为 $l_c \gg l_g$,则磁路的磁通势为

$$\Delta H l_c = \Delta B \left(l_c + \frac{l_g}{\mu_0} \right) \frac{1}{\mu_r},$$

式中 μ_c 为铁芯平均导磁率； μ_0 为空气导磁率。

由此得出有空气隙铁芯的平均导磁率为

$$\mu_{\Delta 3} = \frac{\mu_c}{1 + \mu_c l_3 / l_c} < \mu_c$$

由于铁芯的导磁率 μ_c 开始随 ΔB 的增加而增大，然后又降低，故最佳空气隙为

$$(l_3 / l_c)_{\text{opt}} \approx 2 / \mu_c$$

上式给出 $\mu_{\Delta 3}$ 的最大值。当 $\mu_c = 10^3$ 时，比值为 $l_3 / l_c = 2 \cdot 10^{-3}$ ，即空气隙应最小。

大批生产时，将铁芯切开，对绕制线圈是比较方便的。

对于无空气隙、矫顽磁力小的导磁体去磁方法，是在初级线圈上接通直流或脉动电流，使其建立脉冲磁化反磁场。

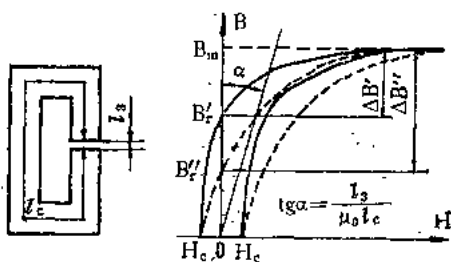


图1—4

如果去磁力大，则原则上获得的剩余磁感为负，如此，可得到大于饱和和磁通密度的磁感增量。这种去磁法需要专用直流电源或脉动电流源及与它们串联的扼流圈。扼流圈必须绝缘，以防止在脉冲变换过程中造成脉冲变压器短路(图1—5)。

高压或大功率脉冲变压器需要较大的磁感增量。功率脉冲变压器由脉

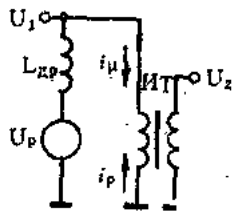


图1—5

冲发生器供给能量。脉冲发生器中 L_{π} 、 C_{π} 等元件构成仿真线，如图1—6所示。贮能电容器的充电电流通过初级线圈时，便形成一个去磁场。为提高充电电流的去磁作用，可增加变压器线圈匝数，或采用去磁电源和保护扼流圈的附加去磁线圈。

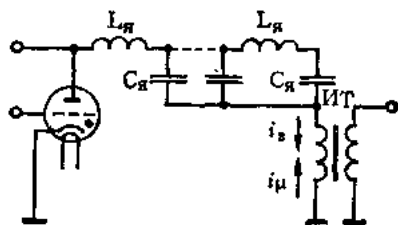


图1—6

1—3 涡流损耗计算

为便于计算涡流损耗，假定铁芯材料的特性是线性的，即磁化周期内局部磁滞回线宽度很窄小（可予忽略）和没有饱和的情况下， $\mu_{\Delta} = \text{常数}$ 。以上述情况为条件，在 $t = 0$ 时，对线圈施加矩形脉冲电压，沿铁芯片截面的平均磁感与它的平均磁场强度是单值对应关系。在符合电磁感应规律的条件，它们随时间以线性增长。即

$$B = \frac{\Delta B}{\tau} t; \quad H = \frac{\Delta H}{\tau} t. \quad (1-6)$$

以线性增长的磁通量所感应的电动势，引起铁芯横截面上流动的涡流。涡流建立自己的磁场，其指向与工作磁场相反，在铁芯中心处的去磁力最强，在边缘为零。故铁芯片里磁通密度分布不均匀，即最外层磁场最大，中心处最小。如果涡流退磁作用很强，则磁通密度最大值能远超过其平均值，该数值为已知脉冲幅度和宽度所决定的。