

开关电源变压器的伏秒容量与测量

陶显芳

2008-1-18

摘要:

伏秒容量表示: 一个变压器能够承受多高的输入电压和多长时间的冲击。在变压器伏秒容量一定的条件下, 输入电压越高, 变压器能够承受冲击的时间就越短, 反之, 输入电压越低, 变压器能够承受冲击的时间就越长; 而在一定的工作电压条件下, 变压器的伏秒容量越大, 变压器的铁芯中的磁通密度就越低, 变压器铁芯就不容易饱和。

通过对开关电源变压器伏秒容量的测量, 可以知道开关电源变压器的铁芯是否正好工作于最佳磁通密度的位置上; 以及占空比, 或者工作频率, 是否取得合理; 同时还可以检查变压器铁芯气隙长度留得是否合适。

正文:

长期以来, 人们在设计或使用开关电源变压器的时候, 一般只关心开关变压器的输入、输出电压、电流的大小, 以及电感量等参数, 而很少关心开关变压器的伏秒容量。其实, 开关变压器的伏秒容量也是一个非常重要的参数, 不过, 目前很多人并不十分清楚伏秒容量到底是个什么东西, 或者怎样对伏秒容量进行测试, 以及怎样使用伏秒容量这个参数。

因此, 这里简单介绍一下什么是开关电源变压器的伏秒容量, 然后再分析怎样对开关电源变压器的伏秒容量进行测量, 并定义其测量方法。

一、什么是变压器的伏秒容量

图 1 是反激式变压器开关电源的工作原理图, 目前 70% 以上的开关电源都是采用反激式变压器开关电源。所谓反激式变压器开关电源, 就是指当变压器的初级线圈正好被直流电压激励时, 变压器的次级线圈没有向负载提供功率输出, 而仅在变压器初级线圈的激励电压被关断后才向负载提供功率输出, 这种变压器开关电源称为反激式开关电源。

在图 1 中, 当输入电压 E 加于开关电源变压器初级线圈 N_1 的两端时, 由于变压器次级线圈产生的电动势与流过二极管的电流方向正好相反, 相当于所有次级线圈均开路, 此时开关变压器相当于一个电感 L_1 。其等效电路如图 2-a) 所示, 图 2-b) 是开关接通时, 电感两端的电压和流过电感 L_1 的电流。

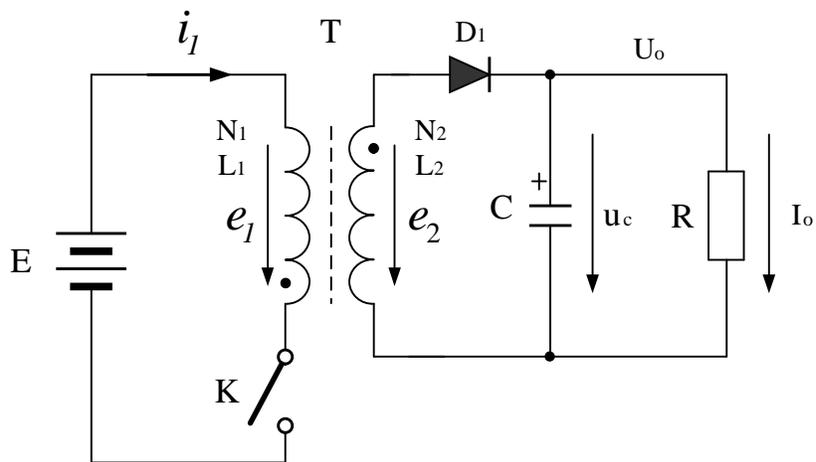


图1

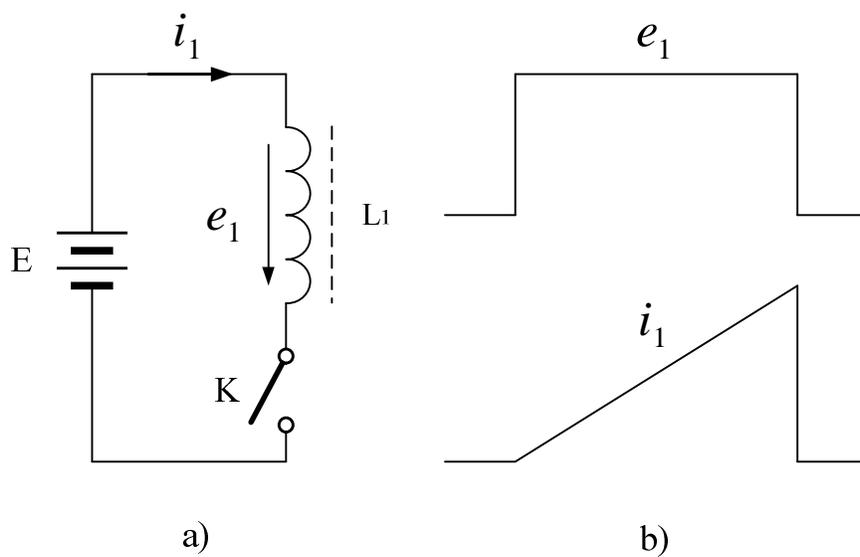


图2

从图2可以看出，流过变压器的电流只有励磁电流，变压器铁心中的磁通量全部都是由励磁电流产生的。如果开关电源变压器初级线圈的电感量是恒定的，或变压器铁芯的导磁率永远保持不变；那么，当控制开关接通以后，流过变压器初级线圈的励磁电流就会随时间增加而线性增加，变压器铁心中的磁通量也随时间增加而线性增加。根据电磁感应定理：

$$e_1 = L_1 \frac{di}{dt} = N_1 \frac{df}{dt} = E \quad \text{—— K 接通期间} \quad (1)$$

式中 e_1 为变压器初级线圈产生的电动势, L_1 为变压器初级线圈的电感量, f 为变压器铁心中的磁通量, E 为变压器初级线圈两端的输入电压。其中磁通量 f 还可以表示为:

$$f = k \times S \times B \quad (2)$$

上式中, k 是一个与单位制相关的系数, S 为变压器铁心的导磁面积, B 为磁感应强度, 也称磁通密度, 即: 单位面积的磁通量。

把 (2) 式代入 (1) 式, 并进行积分:

$$\int_{B_r}^{B_m} k S dB = \int_0^t k \frac{E}{N_1} dt \quad (3)$$

由此求得:

$$N_1 = \frac{Et10^8}{S(B_m - B_r)} \quad (4)$$

或

$$VT = E \times \tau = kS(B_m - B_r)N_1 \quad (5)$$

(4) 式就是计算反激式开关电源变压器初级线圈 N_1 绕组匝数的公式。式中, N_1 为变压器初级线圈 N_1 绕组的最少匝数, S 为变压器铁心的导磁面积, 单位: 平方厘米; B_m 为变压器铁心的最大磁感应强度, 单位: 高斯; B_r 为变压器铁心的剩余磁感应强度, 单位: 高斯), B_r 一般简称剩磁; $\tau = T_{on}$, 为控制开关的接通时间, 简称脉冲宽度, 或电源开关管导通时间的宽度, 单位: 秒; E 为工作电压, 单位为伏。式中的指数 (k) 是统一单位用的, 选用不同单位制, 指数的值也不一样, 这里选用 CGS 单位制, 即: 长度为厘米 (cm), 磁感应强度为高斯 (Gs), 磁通单位为麦克斯韦 (Mx)。

(5) 式中, $E \times \tau$ 就是变压器的伏秒容量, 即: 伏秒容量等于输入脉冲电压幅度与脉冲宽度的乘积, 这里我们把伏秒容量用 VT 来表示。

伏秒容量 VT 表示: 一个变压器能够承受多高的输入电压和多长时间的冲击。

在变压器伏秒容量一定的条件下, 输入电压越高, 变压器能够承受冲击的时间就越短, 反之, 输入电压越低, 变压器能够承受冲击的时间就越长; 而在一定的工作电压条件下, 变

压器的伏秒容量越大，变压器的铁芯中的磁通密度就越低，变压器铁芯就不容易饱和。

当变压器的铁芯面积固定以后，变压器的伏秒容量主要就是由磁通增量 ΔB ($\Delta B = B_m - B_r$) 的大小以及变压器初级线圈的匝数 N_1 来决定。

另外，我们知道，磁感应强度是由磁场强度来决定的，即磁通增量 ΔB 也是由磁场强度来决定的。如图 3 所示。

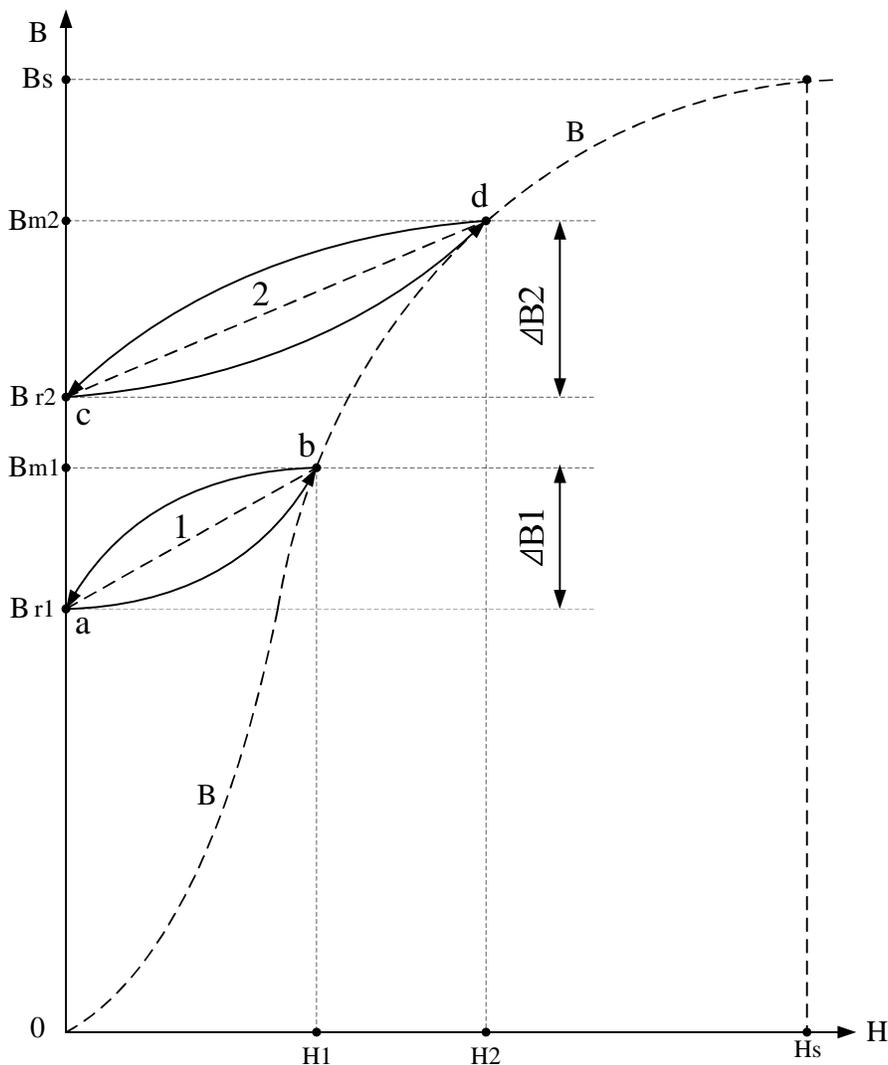


图3

图 3 中，虚线 B 为变压器铁芯的初始磁化曲线，所谓的初始磁化曲线就是变压器铁芯还没有带磁，第一次使用时的磁化曲线，一旦变压器铁芯带上磁后，初始磁化曲线就不再存在了。因此，在开关变压器中，变压器铁芯的磁化一般都不是按初始磁化曲线来进行工作的，而是随着磁场强度增加和减少，磁感应强度将沿着磁化曲线 ab 和 ba，或磁化曲线 cd 和 dc，

来回变化。当磁场强度增加时，磁场强度对变压器铁芯进行充磁；当磁场强度减少时，磁场强度对变压器铁芯进行退磁。

磁场强度由 0 增加到 H_1 ，对应的磁感应强度由 B_{r1} 沿着磁化曲线 ab 增加到 B_{m1} ；而当磁场强度由 H_1 下降到 0 时，对应的磁感应强度将由 B_{m1} 沿着磁化曲线 ba 下降到 B_{r1} 。如果不考虑磁通的方向，磁通的变化量就是 ΔB_1 ，即磁通增量 $\Delta B_1 = B_{m1} - B_{r1}$ 。

如果磁场强度进一步增大，由 0 增加到 H_2 ，则磁化曲线将沿着曲线 cd 和 dc 进行，对应产生的磁通增量 $\Delta B_2 = B_{m2} - B_{r2}$ 。

由图 3 中可以看出，对应不同的磁场强度，即不同的励磁电流，磁通变化量也是不一样的，并且磁通变化量与磁场强度不是线性关系。图 4 是磁感应强度与磁场强度相互变化的函数曲线图。图 4 中，曲线 B 是磁感应强度与磁场强度对应变化的曲线；曲线 m 为导磁率与磁场强度对应变化的曲线。其中：

$$B = mH \quad (6)$$

由图 4 中可以看出，导磁率最大的地方并不是磁感应强度或磁场强度最小或最大的地方，而是位于磁感应强度或磁场强度的某个中间值的地方。当导磁率达到最大值之后，导磁率将随着磁感应强度或磁场强度增大，而迅速下降；当导磁率下降到将要接近 0 的时候，我们就认为变压器铁芯已经开始饱和。如图中 B_s 和 H_s 。

由于导磁率的变化范围太大，且容易饱和，因此，一般开关电源使用的开关变压器都要在变压器铁芯中间留气隙。图 5-a) 是中间留有气隙变压器铁芯的原理图，图 5-b) 是中间留有气隙的变压器铁芯的磁化曲线图，及计算变压器铁芯最佳气隙长度的原理图。

图 5-b) 中，虚线是没留有气隙变压器铁芯的磁化曲线，实线是留有气隙变压器铁芯的磁化曲线；曲线 b 是留有气隙变压器铁芯的等效磁化曲线，其等效导磁率，即曲线的斜率为 $tg b$ ； m_a 是留有气隙变压器铁芯的平均导磁率； m_c 是没留有气隙时变压器铁芯的导磁率。

由图 5 可以看出，变压器铁芯的气隙长度留得越大，其平均导磁率就越小，而变压器铁芯就不容易饱和；但变压器铁芯的平均导磁率越小，变压器初、次级线圈之间的漏感就越大。因此，变压器铁芯气隙长度的设计是一个比较复杂的计算过程，并且还要根据开关电源的输出功率以及电压变化范围（占空比变化范围）综合考虑。不过我们可以通过对开关电源变压器伏秒容量的测量，同时检查变压器铁芯气隙长度留得是否合适。关于变压器铁芯气隙长度的设计，准备留待以后有机会再进行详细分析。

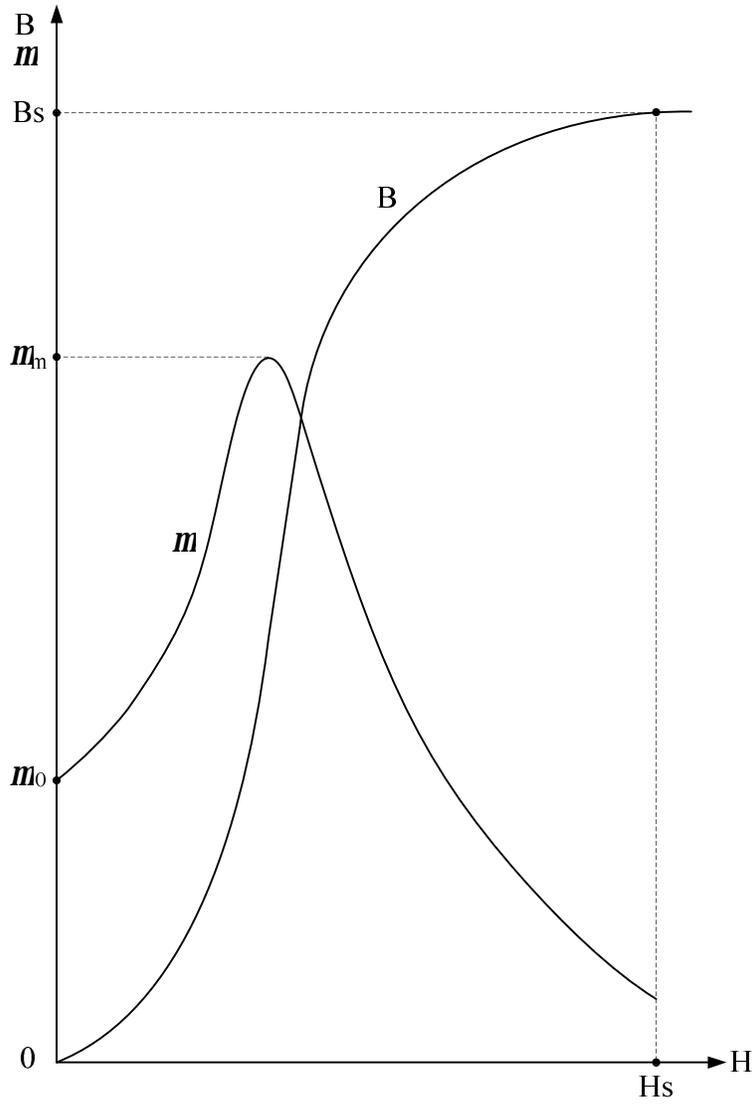


图4

顺便说明，图4中表示导磁率的 m 的曲线也不是一成不变的，它受温度的影响非常大。由于变压器磁芯也是一种半导体材料（金属氧化物），很多半导体器件就是用金属氧化物来制造的，如热敏电阻、场效应管等。半导体材料的特性就是受温度的影响很灵敏，当温度上升到一定范围以后，变压器磁芯的电阻率就会变小，并开始导电。

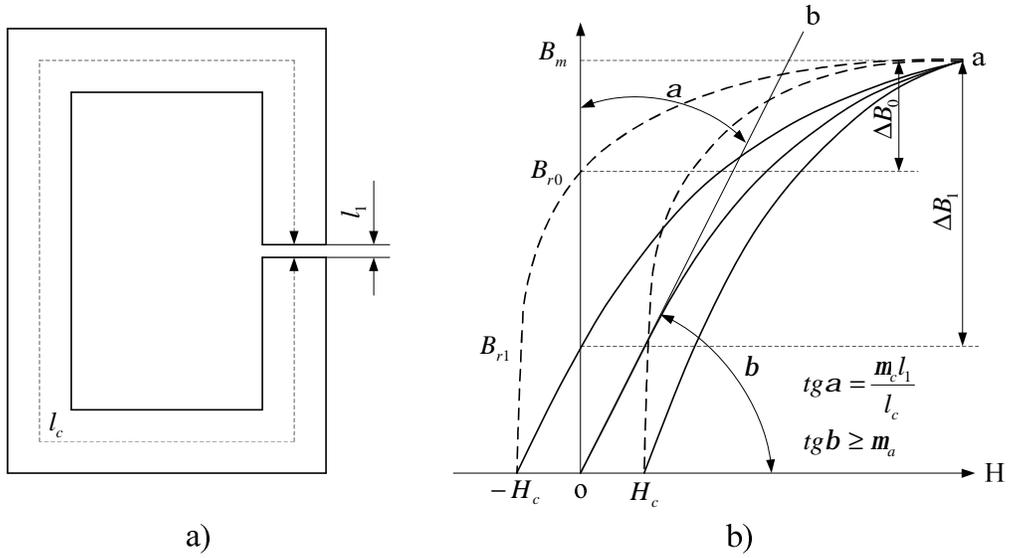


图5

因此，当温度升高到一定范围以后，在变压器磁芯内部就会产生很大的涡流损耗，并使铁芯有效导磁率急速下降。这个使变压器磁芯有效导磁率急速下降的温度点，我们把它称为居里温度点。在实际应用中，我们可以把变压器磁芯有效导磁率下降到最大值的 70% 时的温度，定义为居里温度点。

如图 6 所示。图 6 是日本 TDK 公司高导磁率材料 H5C4 系列磁芯初始导磁率 m_i 随温度变化的曲线图，其居里温度大约为 105°C 。

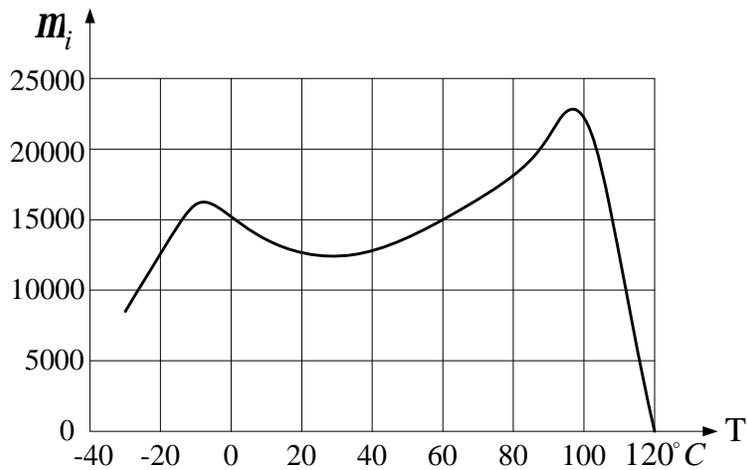


图6

由图 6 可以看出，变压器磁芯的使用环境温度，对变压器的性能影响是非常大的。但我们在使用开关电源变压器的时候，就很少有人去考虑或检测变压器磁芯的居里温度。目前，一般开关电源变压器还都大量选用铁氧体磁芯，这种铁氧体磁芯的居里温度一般都在 120°C 左右，因此，我们对开关电源变压器进行设计时工作温度最好不要超过 110°C 。

二、对开关变压器的伏秒容量进行检测

变压器磁芯出现磁通密度饱和的主要原因，就是变压器的伏秒容量 VT 取得太小，使流过变压器初级线圈的励磁电流过大。下面我们来讨论，怎样对变压器伏秒容量 VT 进行测试的问题。

我们以前在检查 50 周工频小变压器质量好坏的时候，首先都是要检查遥控变压器在最高输入电压之下，流过变压器初级线圈的励磁电流，或漏电流。但目前我们检查开关变压器质量好坏的时候，一般都只能检查开关变压器的电感量或漏感大小。能不能也象检查遥控变压器那样检查开关变压器的励磁电流呢？——很难。因为开关变压器一般都是工作于单极性磁化状态，测试开关变压器的励磁电流需要一个大功率直流脉冲输出电源，这种大功率直流脉冲输出电源工作很不安全，操作也不方便。

为此，我们可以采用另一种更简便的方法，即：电流迭加法，来对开关变压器进行伏秒容量进行测试。电流迭加法就是在变压器线圈中迭加一直流电流，让变压器铁芯进行磁化，然后，对开关变压器的电感量进行测量，从而间接测量开关变压器线圈的最大伏秒容量和极限伏秒容量。

图 7 是采用电流迭加法测试开关变压器电感量或伏秒容量的工作原理图。图 7 中， M 是电感测试仪， L_T 是隔离电感， I 是电流源， L_x 为待测开关变压器的初级电感。 L_T 的电感量必须远远大于被测开关变压器初级线圈的电感量，但如果电流源 I 是一个理想的恒流源，那么隔离电感 L_T 可以省去。下面我们来介绍图 7 的工作原理。

一般进行电感测量的时候，都是让电感线圈通过一个 1KHz 或 10KHz 的交流电，然后通过测试流过电感线圈的电流来间接测量电感线圈的阻抗或电感量。由于流过电感线圈的电流很小，并且是一个交流，用这种方法测试到的电感量与电感线圈工作时体现出来的电感量是有区别的，并且区别很大，因为变压器铁芯的导磁率不是一个常数。

如果让被测试电感流过一个可变电流，就可以改变被测试电感磁化曲线的工作点，由此，就可以测试磁化曲线上任何一点的导磁率或者电感量，并且可以根据电感量的变化，找出磁饱和时的工作点，根据磁饱和和工作点就可以进一步测量或计算出开关变压器的伏秒容量 VT 或最大伏秒容量 VT_m 及极限伏秒容量 VT_{max} 。

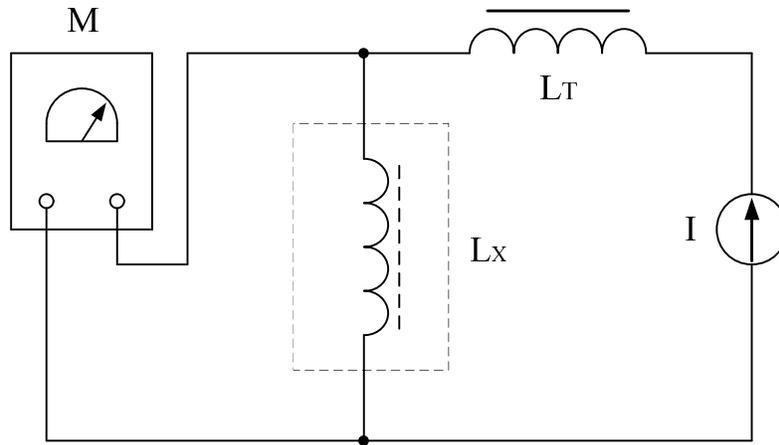


图7

下面我们来分析，怎么样定义迭加电流的大小和对开关变压器伏秒容量 VT 的测试。我们先看图 8。

图 8 是变压器铁芯留有气隙的电流-电感或电流-磁通密度函数曲线图，在图 8 中，X 轴代表流过变压器线圈的迭加电流 I ，Y 轴代表变压器线圈的电感 L 或变压器铁芯中的磁通密度 B ； $L-I$ 为变压器线圈电感 L 对应于迭加电流 I 的变化曲线， $B-I$ 为变压器铁芯的磁通密度 B 对应于迭加电流 I 的变化曲线（初始磁化曲线）。

当迭加电流 $I = 0$ 时，测得变压器线圈的电感量为 L_0 ，由于变压器铁芯初始磁化的时候，导磁率比较小，所以变压器线圈的初始电感量 L_0 也比较小；随着迭加电流 I 的增加，变压器铁芯的导磁率也会增加，所以变压器线圈的电感量也随着迭加电流 I 的增加而增加，当迭加电流 I 达到某个值 ($I = I_0$) 的时候，变压器线圈的电感量达到最大值 L_{max} ，随后，随着迭加电流 I 的增加，变压器线圈的电感量反而减小，并迅速下降，当迭加电流 $I = I_s$ 时，变压器铁芯的磁通密度开始出现饱和 ($B = B_s$)，变压器线圈的电感量将减小到差不多等于 0。

实际上，图 8 中，改变迭加电流 I 的大小，其作用就相当于图 2-b) 中的锯齿电流 i_1 ，即：变压器线圈的电感量是受流过变压器线圈的直流量调制的。如果我们把流过变压器线圈的最大电流 I_m 与变压器铁芯的最大磁通密度 B_m 对应，那么，我们可以用图 8 来定义流过变压器线圈的最大电流 I_m 和变压器铁芯的最大磁通密度 B_m 。

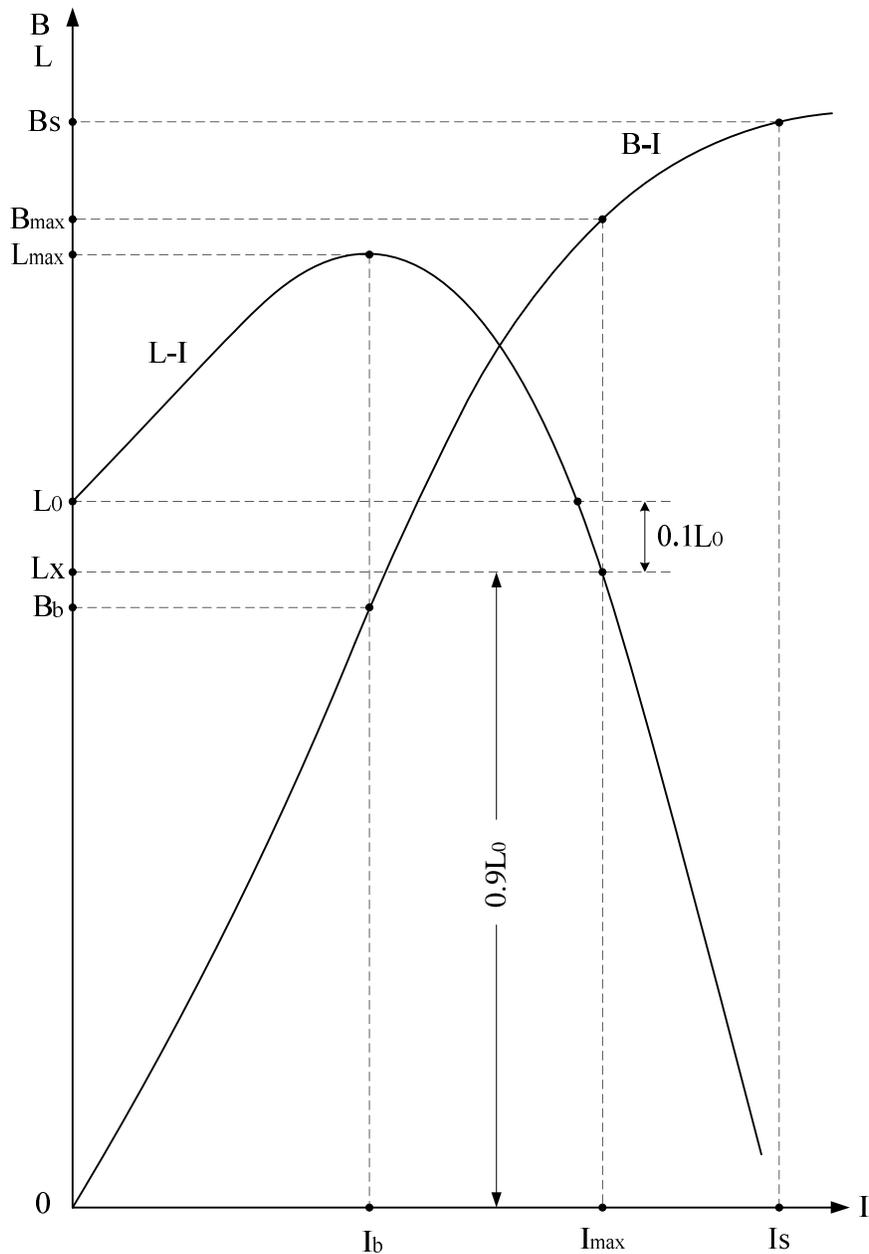


图8

由于最大磁通密度 B_m 概念经常被使用，为了避免混淆，这里我们另外再定义两个新概念：一个为极限磁通密度 B_{max} ，另一个为极限电流 I_{max} 。

我们定义：当流过变压器初级线圈的电流 I ，使变压器初级线圈的电感 L 下降到初始电感 L_0 的 90% 时，此时流变压器线圈的电流，我们称之为极限电流 I_{max} ，对应变压器铁芯中的磁通密度 B ，我们称之为极限磁通密度 B_{max} 。

任何一个带铁芯的电感线圈都可以用图 7 表示的测量方法，来测量电感线圈的初始电感

量 L_0 和最大电感量 L_{max} ，以及极限电流 I_{max} 。通过测量电感量，以及与其对应的极限电流值 I_{max} ，就可以计算出开关电源变压器或储能电感线圈的极限伏秒容量 VT_{max} 。在开关电源变压器的使用过程中，任何时刻，都不能超出开关电源变压器的极限伏秒容量 VT_{max} 。

反过来，我们还可以在特定的情况下，比如：在工作电压最高、负载最重的情况下，先测量开关电源的占空比或输出电压的脉冲宽度 t ，然后计算出变压器初级线圈电流的最大值 I_m ，最后给最大值 I_m 乘以一个安全系数 K ($K=1.43$)，其结果就是流过开关电源变压器初级线圈电流的极限值 I_{max} ，即用于测量开关电源变压器初级线圈电感 L_x 的迭加电流值。

由此可知，开关电源变压器（反激式）在任何情况下，其初级线圈的工作电流都不能超过图 8 中的 I_{max} ，对应的磁通密度也不能超过图 8 中的 B_{max} 。

由前面 (1) 式：

$$e_1 = L_1 \frac{di}{dt} = N_1 \frac{df}{dt} = E \quad \text{—— K 接通期间} \quad (1)$$

可以求得：

$$i = \int_0^t \frac{e_1}{L_1} dt = \frac{E}{L_1} \int_0^t dt \quad \text{—— K 接通期间} \quad (7)$$

即：

$$I_m = \frac{E}{L_1} t = \frac{VT}{L_1} \quad (8)$$

或

$$VT = I_m \times L_1 \quad (9)$$

以及

$$I_{max} = \frac{E}{L_{0.9}} t_m = \frac{VT_{max}}{L_{0.9}} \quad (10)$$

或

$$VT_{max} = I_{max} \times L_{0.9} \quad (11)$$

上面 (8) 式是用来计算开关电源变压器初级线圈或储能电感线圈电流的公式，式中 I_m 为流开关电源变压器初级线圈或储能电感线圈电流的最大值，即：开关接通后，持续时间等于 t 时，流过变压器初级线圈或储能电感线圈电流的瞬时值； E 为开关电源的工作电压， V 为加于变压器初级线圈两端的输入电压（直流脉冲电压）， L_1 为变压器初级线圈电感量。

(9) 式是用来计算开关电源变压器或储能电感线圈伏秒容量 VT 的公式。与 (8) 式和 (9) 式对应。

(10) 式是用来计算开关电源变压器或储能电感线圈的极限伏秒容量 VT_{max} 的公式。

式中： VT_{max} 变压器或电感线圈或储能电感线圈的极限伏秒容量， V 为加于开关电源变压器初级线圈两端直流脉冲的幅度（单位：伏）， T_{max} 为加于开关电源变压器初级线圈或储能电感线圈两端直流脉冲的极限时间（宽度，单位：秒）；

I_{max} 就是根据图 7 对开关电源变压器初级线圈或储能电感线圈电感 L_x 进行测试时的极限迭加电流，即：当迭加电流 I 增加，使开关电源变压器初级线圈或储能电感线圈的测量电感 L_x 等于初始电感量 L_0 的 0.9 倍时，流过开关电源变压器初级线圈或储能电感线圈的迭加电流值。也可以把 I_{max} 看成是流过开关电源变压器初级线圈或储能电感线圈的极限电流值，此电流可以采用图 7 和图 8 定义的方法来测量； $L_{0.9}$ 为变压器初级线圈或储能电感线圈初始电感 L_0 下降到 90% 时的值。

这里顺便说明， I_m 与 I_{max} ， VT_m 与 VT_{max} 在性质上基本相同，只是后者用 max 来表示它是前者的极限值。

三、开关变压器伏秒容量的意义

开关电源变压器或储能电感线圈的极限伏秒容量 VT_{max} 参数，其实与晶体管的最大集电极电压 BV_{ceo} 参数一样重要。在晶体管放大电路中，当晶体管集电极与发射极两端的电压超过最大集电极电压 BV_{ceo} ，晶体管就会被击穿损坏。同样，在开关电源中，当施加于开关电源变压器的伏秒容量（电压幅度与时间长度）超过极限伏秒容量 VT_{max} 时，开关电源变压器也要损坏，并且还会损坏电源开关管，及其它电路。

开关变压器伏秒容量的意义相当于图 9 中矩形的面积，面积的两条边分别由开关变压器的工作电压（直流脉冲幅度） V 和通电持续时间 T （脉冲宽度）的乘积组成。其极限伏秒容量相当于黄色区域部分的面积，绿色区域部分相当于开关变压器正常工作时伏秒容量的面积。

不过这里还应强调指出，只要伏秒容量的面积没有超出极限伏秒容量的面积， V 或 T 任何一条边分别都可以超出图 9 中所示的， V 或 T 边上的长度。

结合图 8 和图 9，我们可以看出，使用开关变压器时，最好让流过开关变压器线圈的最大工作电流约等于图 8 中 I_b ，或者让开关脉冲的宽度约等于 t_b 。

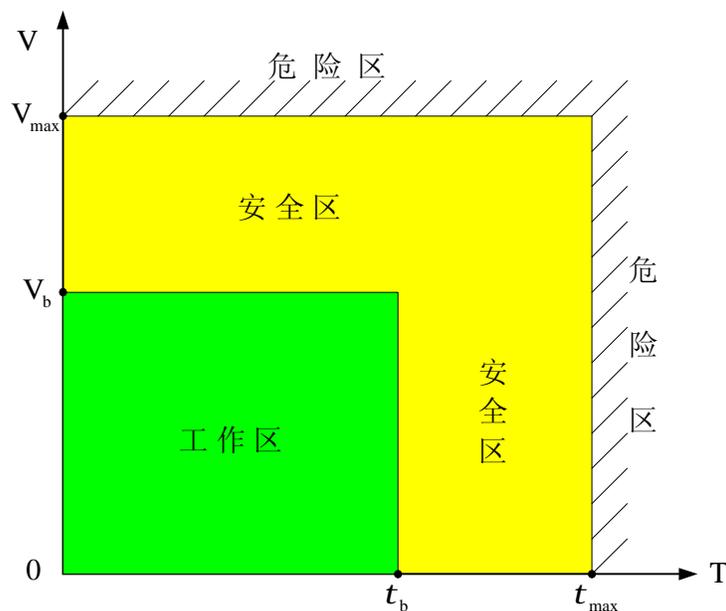


图9

当流过开关变压器线圈的最大工作电流等于图 8 中 I_b 时，变压器线圈的电感量为最大值 L_{max} ；在此种情况下，变压器的工作效率最高，因为，此时变压器铁芯损耗与变压器线圈损耗的乘积最小（磁滞损耗与励磁电流的大小成正比，涡流损耗与磁通密度增量的平方成正比；铜阻的损耗与导线的长度成正比）；并且，变压器的伏秒容量 VT_b 与极限伏秒容量 VT_{max} 还有很大的安全距离。

目前，一般开关电源变压器还都大量选用铁氧体磁芯，这种铁氧体磁芯的磁饱和和磁通密度 B_s 一般为 4500~5000 高斯，因此，由图 8 可以看出，开关电源变压器铁芯的最佳磁通密度 B_b 大约为磁饱和和磁通密度 B_s 的一半左右，即： $B_b = 2300 \sim 2500$ 高斯。因此，当使用（4）式对变压器初级线圈进行计算的时候，公式中最大磁通密度 B_m 的取值，最好不要超过 2500 高斯。

由于开关电源变压器铁芯磁饱和和磁通密度 B_s 参数的分散性，用什么方法，我们才能知道开关电源变压器的铁芯正好就工作于最佳磁通密度 B_b 的位置上呢？或者我们拿到一个开关电源变压器，到底应该取多大的脉冲宽度，以及占空比，或者工作频率，才合理呢？

这个必须通过对开关电源变压器伏秒容量的测量，才能最后作出决定，同时还可以检查变压器铁芯气隙长度留得是否合适。

下面我们通过对开关电源变压器伏秒容量进行测量的例子，进一步分析伏秒容量的实用意义。

四、开关变压器伏秒容量测量举例

上面我们已经分析开关变压器伏秒容量的意义和测量方法，下面我们再进一步举例来详细分析开关变压器伏秒容量的测量方法，以及通过对开关变压器伏秒容量的测量，验证开关变压器工作状态的合理性。

例 1: 电视机中使用的行扫描回扫变压器，简称高压包，其工作原理也属于反激式开关电源变压器，其初级线圈的电感量为 6 毫亨，工作电压一般为 120V，正程扫描时间（脉冲宽度） t 为 $52\mu\text{S}$ ，逆程扫描时间为 $12\mu\text{S}$ 。检测它的伏秒容量是否设计得合理，或是否工作与最佳工作状态。

为此，我们可以根据（8）式，先计算流过高压包初级线圈的最大电流 I_m ，然后再求其极限电流 I_{max} 的值，即：测试时选用迭加电流的值。

把已知参数代入（8）式：

$$I_m = \frac{E}{L_1} t = \frac{VT}{L_1} \quad (8)$$

即：

$$I_m = \frac{E}{L_1} t = \frac{120\text{V}}{6 \times 10^{-3}} 52 \times 10^{-6} = 1.04 \text{ A} \quad (12)$$

根据上面分析，以及图 8 和图 9，正常工作时，流过高压包初级线圈的最大电流 I_m 不应该超过极限电流值 I_{max} 的 70%，由此，可以求得流过高压包初级线圈的极限电流 I_{max} 为 1.49 A。

上面计算出来的极限电流 I_{max} 值，就是用来测试高压包初级线圈的迭加电流的数值。根据图 7，把电流源的电流设置为 1.49 A，即：设置测试高压包初级线圈的迭加电流为 1.49 A，然后测试高压包初级线圈的电感；如果测试结果 L_x 的数值等于或者大于初始电感 L_0 的 90%，则说明，高压包初级线圈的伏秒容量设计是合格的，即：高压包铁芯的磁通密度基本工作于最佳状态范围之内；如果测试结果 L_x 小于初始电感 L_0 的 90%，则说明，高压包初级线圈的伏秒容量余量太小，不合格，即：高压包铁芯的磁通密度工作于接近饱和区的范围之内，磁滞损耗以及涡流损耗比较大，并且变压器容易出现磁饱和。

对于高压包除了测试伏秒容量的大小之外，还应该检测变压器初级线圈的漏感。正常漏感的数值一般小于初级线圈电感量的 2%，如果太大，则说明铁芯留的气隙长度过大，或者变压器初、次级线圈的绕线方法或结构不合理。

这里顺便说明，采用图 7 测试时应该注意的地方。图 7 中，隔离电感 L_T 的数值要求是测试电感 L_x 数值的 3 倍以上，并且测量高压包初级线圈的初始电感值 L_0 时，最好也要接入电路之中。这里，隔离电感 L_T 可选取 20 毫亨以上的矽钢片直流电感，电感的铁芯要留有气

隙；流电源可用一个稳压电源与一个大功率电阻串联代替，如图 10，或用一个稳压电源与一个大功率晶体放大器串联来代替，如图 11。

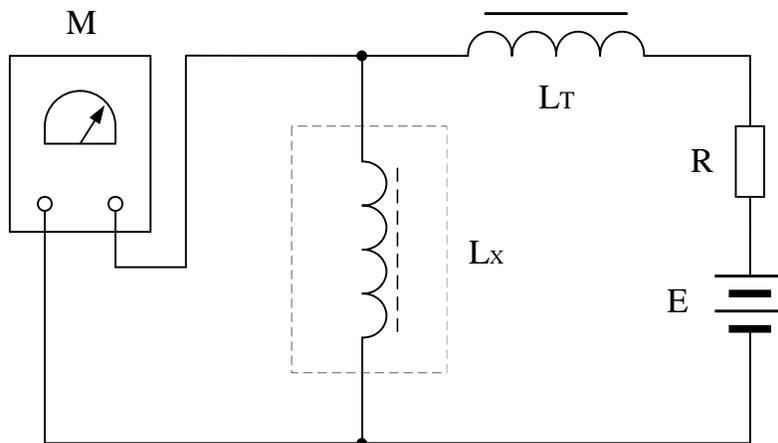


图10

在图 10 中， E 为稳压电源， R 为大功率电阻，阻值范围在 $1\sim 10$ 欧姆比较合适，阻值太大损耗功率会很大；调节稳压电源的电压输出，就可以调节迭加电流的大小。

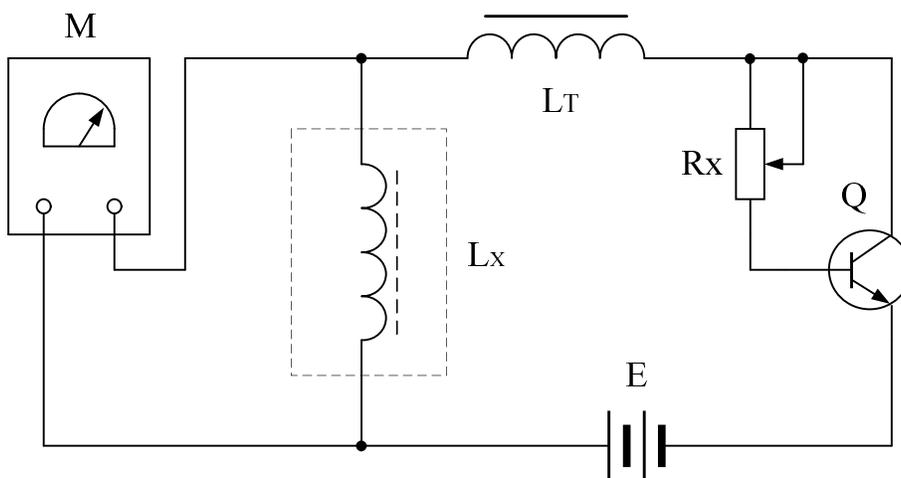


图11

在图 11 中， E 为稳压电源， R_x 为可调电阻， Q 为晶体管大功率放大器（必须带散热片）；调节稳压电源的电压输出，或改变可变电阻的阻值，就可以改变迭加电流的大小，但晶体管大功率放大器集电极与发射极之间的电压降不要大于 $10V$ ，否则，晶体管大功率放大器的损

耗将很大。一般稳压电源都有电流输出指示，所以在测试电路中不需要另外安装电流表。

这里特别指出，在测试高压包初级线圈的初始电感 L_0 的时候，高压包的铁芯必须要退磁，否则，测试结果将不准确。一般带有磁性的开关变压器初级线圈的电感量，要略大于没带磁性开关变压器初级线圈的电感量。高压包退磁的方法请参考图 13 和图 14，以及说明。

另外，迭加电流 I_{max} 的值一般是正常工作时流过高压包初级线圈电流（平均值或有效值）的好几倍。例如：上例测试的高压包，正常工作时，其平均电流 I_p 大约才有 0.42 A，但迭加电流 I_{max} 的值为 1.49 A；由此求得，迭加电流 I_{max} 的值是正常工作时平均电流的 3.5 倍。一般高压包初级线圈漆包线的电流密度都小于 $3A/mm^2$ ，从而可求得，流过高压包初级线圈漆包线迭加电流的最大电流密度为 $10.5 A/mm^2$ 。

因此，通过对高压包初级线圈伏秒容量的检查，同时也是对高压包初级线圈的线径进行检查。一般漆包线在 40 度温升的情况下，其最大电流密度大约在 $13A/mm^2$ 左右（直流），因此，通过测量高压包线圈的温升就可以知道高压包线圈的设计是否合理。

这里顺便介绍一下电流平均值 I_p 的求法，以及其与最大电流 I_m 和极限电流 I_{max} 的关系。图 12 是电流平均值 I_p 与最大电流 I_m 和极限电流 I_{max} 之间的关系图。

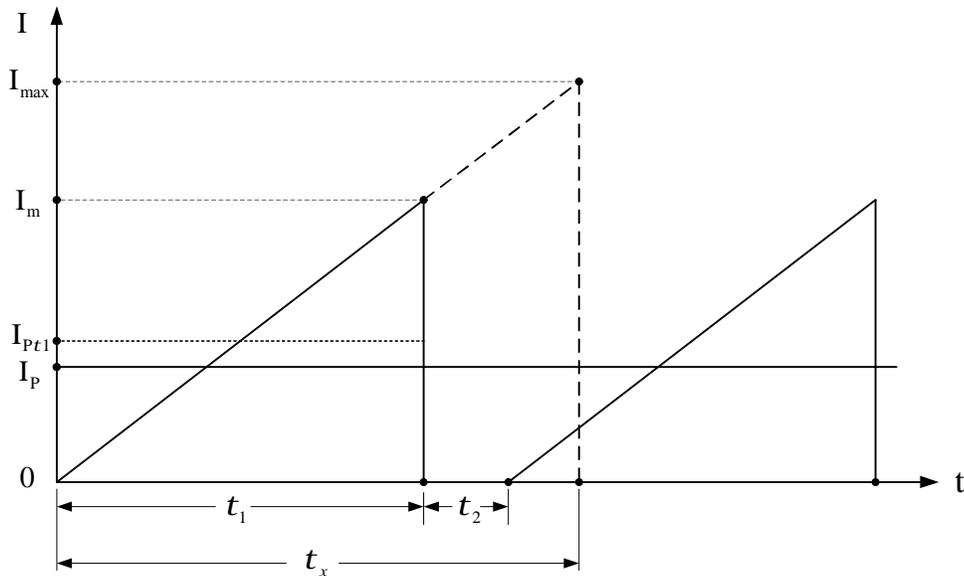


图12

图 12 中， I_p 为流过高压包初级线圈的平均电流， I_{pt1} 为正程扫描期间，流过高压包初级线圈的平均电流； I_m 为正程扫描期间，流过高压包初级线圈的最大电流； I_{max} 为正程扫描期间，流过高压包初级线圈的极限电流； t_1 为正程扫描时间（ $52\mu S$ ）， t_2 为逆程扫描时

间 ($12\mu S$), t_x 为极限正程扫描时间。

例 2: 电视机开关电源一般都是脉冲调宽式反激式开关电源, 它有两种工作方式: 一种是脉冲调宽兼调频工作方式; 另一种工作方式是工作频率不变, 只对脉冲宽度进行调制。前一种工作方式多在自激式开关电源中使用, 后一种工作方式多在由集成电路构成的他激式开关电源中使用。

设一个 **100W** 电视机开关电源使用的开关电源变压器, 其初级线圈的电感量为 1 毫亨, 其最高工作电压为 360V, 最低工作电压为 110V。由于开关管的耐压一般最高只有 600V, 并且还要预留最少 20% 的余量, 因此, 在最高工作电压和负载最重的状态下, 开关电源的占空比最大只能取 0.25, 即: $D = 0.25$; 当开关电源的负载为最重的时候, 占空比也处于最大值。设开关电源的工作频率为 40kHz, 当占空比为最大值时电源开关管导通时的脉冲宽度 $t = 6.25\mu S$ 。

根据上面已知参数我们可以利用 (8) 式来计算流过开关电源变压器初级线圈的最大电流 I_m , 然后再求其极限电流 I_{max} 的值, 即: 测试开关电源变压器初级线圈电感时选用的迭加电流值。

把已知参数代入 (8) 式:

$$I_m = \frac{E}{L_1} t = \frac{VT}{L_1} \quad (8)$$

即:

$$I_m = \frac{E}{L_1} t = \frac{360V}{1 \times 10^{-3}} 6.25 \times 10^{-6} = 2.25 A \quad (14)$$

根据前面分析, 以及图 8 和图 9, 正常工作时, 流过高压包初级线圈的最大电流 I_m 不应该超过极限电流值 I_{max} 的 70%, 由此, 可以求得流过高压包初级线圈的极限电流 I_{max} 为 3.21 A。

上面计算出来的极限电流 I_{max} 值, 就是用来测试开关电源变压器初级线圈的迭加电流的数值。根据图 7, 把电流源的电流设置为 3.21 A, 即: 测试开关电源变压器初级线圈的迭加电流为 3.21 A, 然后测试开关电源变压器初级线圈的电感; 如果测试结果 L_x 等于或者大于初始电感 L_0 的 90%, 则说明, 开关电源变压器初级线圈的伏秒容量设计是合格的; 如果测试结果 L_x 小于初始电感 L_0 的 90%, 则说明, 开关电源变压器初级线圈的伏秒容量余量非常小, 不合格。

顺便说明, 开关电源变压器的伏秒容量不但与工作电压有关, 而且还与开关电源的占空比有关, 即: 与脉冲宽度有关。

假设其它参数不变, 而把工作电压由 360V 降为 110V 时, 开关电源的最大占空比可取

值为 0.7708，即：D = 0.7708。当开关电源的工作频率为 40kHz 时，电源开关管导通时的脉冲宽度 $t = 19.27\mu\text{s}$ ，由此可以求得流过开关电源变压器初级线圈的最大电流 I_m 为：

$$I_m = \frac{E}{L_1} t = \frac{110\text{V}}{1 \times 10^{-3}} 19.27 \times 10^{-6} = 2.12 \text{ A} \quad (15)$$

比较 (14) 和 (15) 式可以看出，虽然开关电源变压器的工作电压不同，但两式最大工作电流 I_m 以及极限电流 I_{max} 基本上是一样的。值得注意的是，虽然他们的最大电流值基本相同，但它们的平均电流值却不一样。前者的平均电流为 0.281A，后者的平均电流为 0.817A。因此，在选取变压器初级线圈漆包线粗细的时候，一定要按平均电流的大小来选取。由此可知，一个双电压开关电源 (110V/220V)，其工作效率要比单电压开关电源低，因为，双电压开关电源铜阻损耗要比单电压开关电源大很多。

同理，除了测试变压器初级线圈伏秒容量的大小之外，还应该检测变压器初级线圈的漏感大小。正常漏感的数值一般小于初级线圈电感量的 2%，如果太大，则说明铁芯留的气隙长度过大，或者变压器初、次级线圈的绕线方法或结构不合理。

如果我们通过测试，已经知道开关变压器初级线圈的极限电流 I_{max} 数值，我们又怎么来确定开关变压器的工作电压和脉冲宽度 t 呢？

开关变压器的工作电压和脉冲宽度 t 的关系，同样可以根据 (8) 式求得。在选定工作电压的情况下，可把 $I_m = 0.7 I_{\text{max}}$ 代入 (8) 式，即可求得最大脉冲宽度 t_m 。

然后再根据脉冲宽度 t 进一步求占空比 D 和工作频率。下面 (16) 式和 (17) 式是计算脉冲宽度 t 和占空比 D 以及工作频率的关系式：

$$D = \frac{t}{T} = t \times F \quad (16)$$

$$\frac{D_m}{1 - D_m} = \frac{U_{\text{Cmax}} - E}{E} \quad (17)$$

(16) 式中，D 为开关电源工作时的占空比， D_m 为开关电源工作时的最大占空比， t 为脉冲宽度，T 为开关电源的工作周期，F 为工作频率，E 为开关电源的工作电压， U_{Cmax} 为电源开关管集电极（或漏极）的最大工作电压。一般 U_{Cmax} 最多只能取电源开关管最大耐压值 BV_{ceo} 的 80%，即选用电源开关管时，其耐压要留有 20% 的余量。

对于开关电源变压器伏秒容量的测试，必须结合具体电路进行。首先用示波器测量，在

最高输入电压和负载最重的状态之下，电源开关管导通时的脉冲宽度 t （或占空比 D ）；然后测试电源开关管集电极的最大工作电压 U_{Cmax} ，并且要求 U_{Cmax} 小于电源开关管最大耐压值 BV_{ceo} 的 80%；随后才根据（8）式计算流过开关变压器初级线圈的最大电流 I_m 和极限电流值 I_{max} ，最后采用图 7、图 10、图 11 的方法来对开关变压器的极限伏秒容量 VT_{max} 进行测量和计算。

顺便指出，决定开关电源占空比 D 大小的主要因数是开关电源的输入电压与输出电压比 $U_i:U_o$ ，即：开关电源变压器初、次级线圈的匝数比 n 。检查 U_{Cmax} 的大小，实际上也是检查开关电源变压器初、次级线圈的匝数比 n 是否设计得合理。

此方法的好处是，不但可以对开关变压器的关键技术参数进行测试和监控，同时也可以检查设计师设计电路的参数是否合理。

这里还需特别指出，在测试开关变压器初级线圈的初始电感 L_0 的时候，开关变压器的铁芯必须要退磁，否则，测试结果将不准确。一般带有磁性的开关变压器初级线圈的电感量，要略大于没带磁性开关变压器初级线圈的电感量。开关变压器退磁的方法请参考图 13 和图 14，以及说明。

六、开关变压器的消磁方法

任何铁磁材料被磁化后都会带磁，开关电源变压器铁芯也不例外，只不过由于开关电源变压器铁芯选用的是软磁材料，其剩磁的磁场强度相对于磁性材料来说比较低罢了。

开关电源变压器退磁的最好方法是让变压器初级线圈在非常短的时间内通过一个幅度为 3~5 倍 I_{max} （极限电流）的阻尼振荡电流。因此，可用一个 20~40 欧姆的消磁热敏电阻（可用两个消磁热敏电阻串联）与高压包初级线圈串联，然后接到 110~220V/50Hz 交流电源上，大约需要 20 多秒钟，待消磁热敏电阻完全加热后，即可达到退磁的目的，如图 13 所示。在图 13 中， RT 为热敏电阻， L_x 为开关电源变压器的初级线圈。

对于小功率开关电源变压器，由于容许流过变压器初级线圈的电流比较小，因此，在消磁电路中需要采取限流措施。

具体方法是，先用一个零点几法拉的电容与小功率开关电源变压器的初级线圈串联，然后再与一个几微法的电容并联，最后再与一个 20~40 欧姆的消磁热敏电阻（可用两个消磁热敏电阻串联）串联。退磁时把电路接到 110~220V/50Hz 交流电源上，大约需要 20 多秒钟，待消磁热敏电阻完全加热后，即可达到退磁的目的，如图 14 所示。

图 14 中 RT 为热敏电阻， L_x 为小功率开关电源变压器初级线圈， $C1$ 为分流电容， $C2$ 为限流电容。电容 $C1$ 和 $C2$ 的大小，需根据小功率开关电源变压器初级线圈励磁电流的大小来决定。一般消磁电流需要达到极限电流 I_{max} 的 3~5 倍。

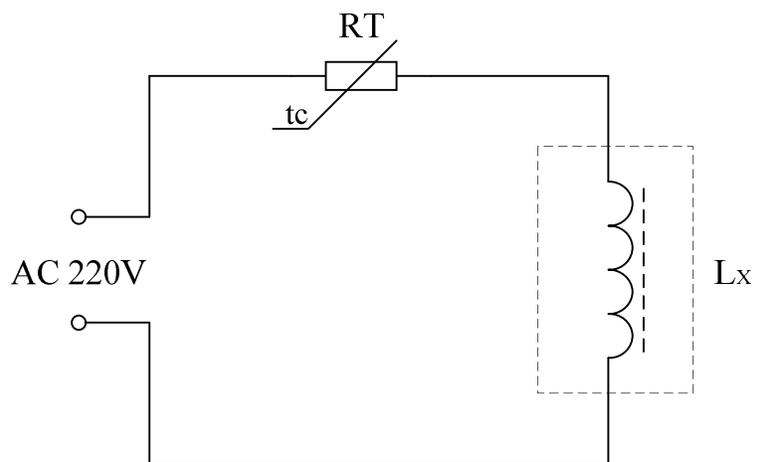


图13

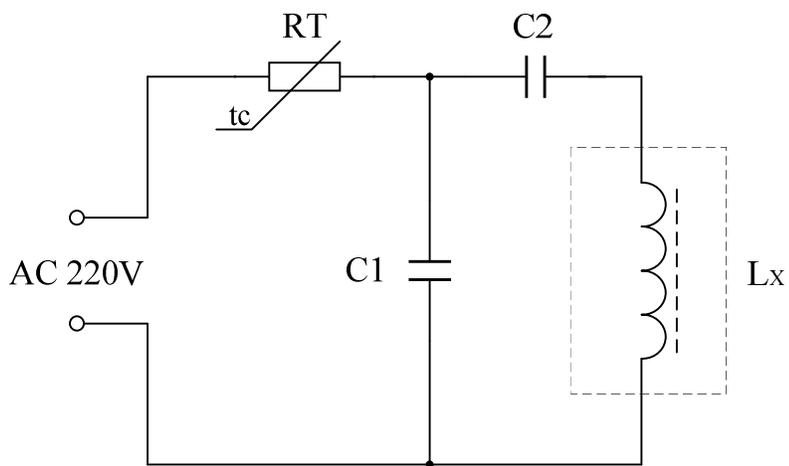


图14

陶显芳 2008-01-18