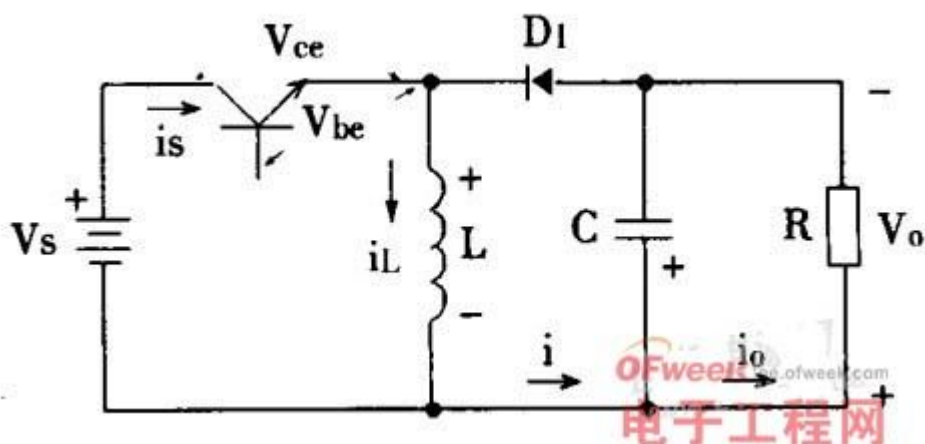


反激式(RCD)开关电源原理及设计

因该电源是公司产品的一个配套使用，且各项指标都不是要求太高，故选用最常用的反激拓扑，这样既可以减小体积（给的体积不算大），还能降低成本，一举双的！

反激拓扑的前身是 Buck-Boost 变换器，只不过就是在 Buck-Boost 变换器的开关管和续流二极管之间放入一个变压器，从而实现输入与输出电气隔离的一种方式，因此，反激变换器也就是带隔离的 Buck-Boost 变换器。

先学习下 Buck-Boost 变换器



工作原理简单介绍下

1. 在管子打开的时候，二极管 D1 反向偏置关断，电流 I_s 流过电感 L，电感电流 i_L 线性上升，储存能量！
2. 当管子关断时，电感电流不能突变，电感两端电压反向为上负下正，二极管 D1 正向偏置开通！给电容 C 充电及负载提供能量！
3. 接着开始下个周期！

从上面工作可以看出，Buck-Boost 变换器是先储能再释放能量， V_s 不直接向输出提供能量，而是管子打开时，把能量储存在电感，管子关断时，电感向输出提供能量！

根据电流的流向，可以看出上边输出电压为负输出！

根据伏秒法则

$$V_{in} \cdot T_{on} = V_{out} \cdot T_{off}$$

$$T_{on} = T \cdot D$$

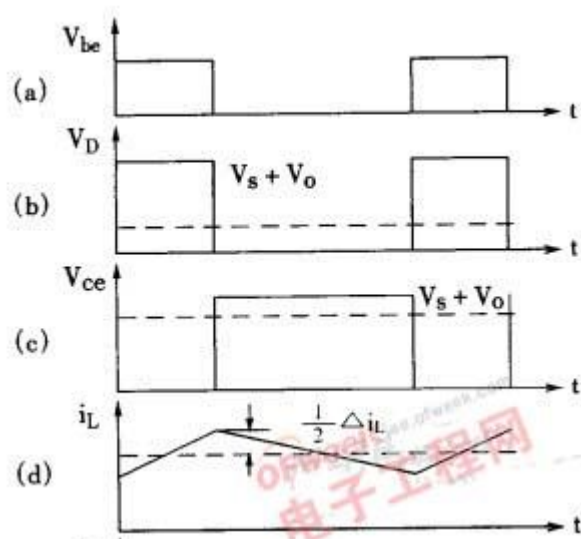
$$T_{off} = T \cdot (1-D)$$

代入上式得

$$V_{in} \cdot D = V_{out} \cdot (1-D)$$

得到输出电压和占空比的关系 $V_{out} = V_{in} \cdot D / (1-D)$

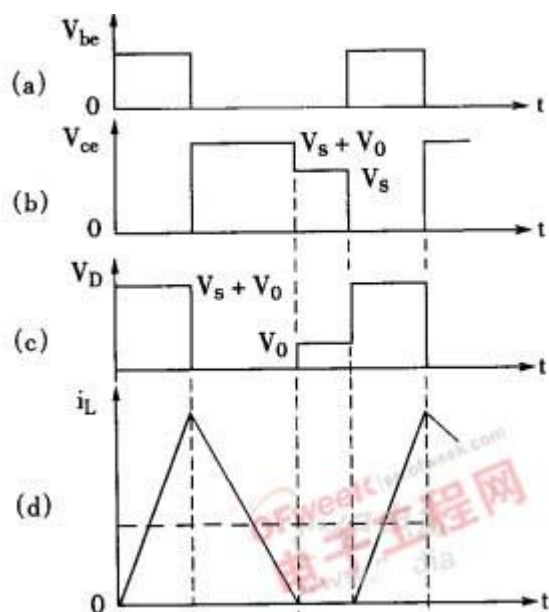
看下主要工作波形



从波形图上可以看出，晶体管和二极管 D_1 承受的电压应力都为 $V_s + V_o$ （也就是 $V_{in} + V_{out}$ ）；

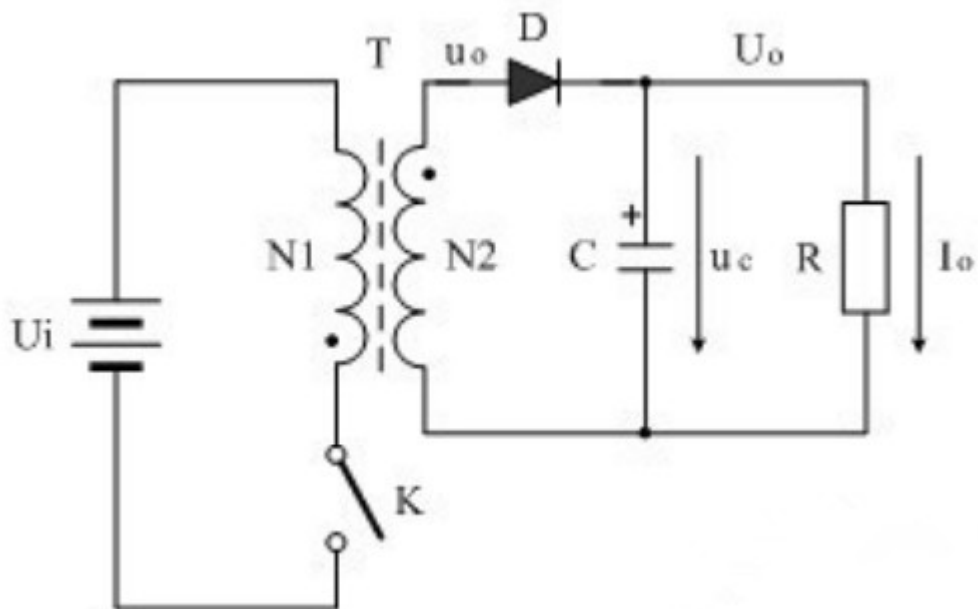
再看最后一个图，电感电流始终没有降到 0，所以这种工作模式为电流连续模式（CCM 模式）。

如果再此状态下把电感的电感量减小，减到一定条件下，会出现这个波形！



从上图可以看出，电感电流始终降到 0 后再到最大，所以这种模式叫不连续模式（DCM 模式）。

把上边的 Buck-Boost 变换器的开关管和续流管之间加上一个变压器就会变成反激变换器！



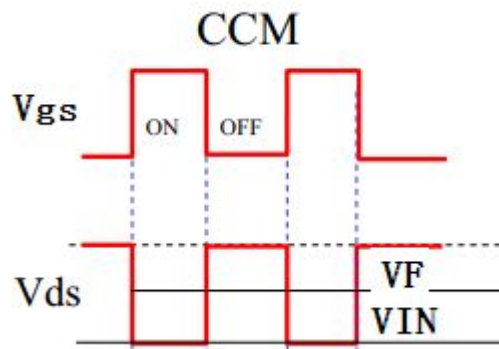
还是和上边一样，先把原理大概讲下：

1. 开关开通，变压器初级电感电流在输入电压的作用下线性上升，储存能量。变压器初级感应电压到次级，次级二极管 D 反向偏置关断。

2. 开关关断，初级电流被关断，由于电感电流不能突变，电感电压反向（为上负下正），变压器初级感应到次级，次级二极管正向偏置导通，给 C 充电和向负载提供能量！

3. 开始下个周期。以上假设 C 的容量足够大，在二极管关断期间（开关开通期间）给负载提供能量！

咱先看下在理想情况下的 VDS 波形



上面说的是指变压器和开关都是理想工作状态！

从图上可以看出 V_{ds} 是由 V_{IN} 和 V_F 组成， V_{IN} 大家可以理解是输入电压，那 V_F 呢？

这里我们引出一个反激的重要参数：反射电压即 V_F ，指次级输出电压按照初次级的匝比反射到初级的电压。可以用公式表示为 $V_F = V_{OUT} / (N_S / N_P)$ ，（因分析的是理想情况，这里我们忽略了整流管的管压降，实际是要考虑进去的）

式中 V_F 为反射电压；

V_{OUT} 为输出电压；

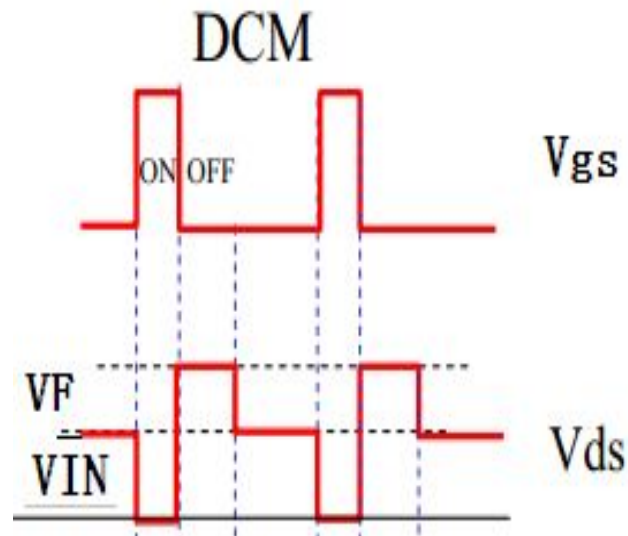
N_S 为次级匝数；

N_P 为初级匝数。

比如，一个反激变换器的匝比为 $N_P : N_S = 6 : 1$ ，输出电压为 12V，那么可以求出反射电压 $V_F = 12 / (1/6) = 72V$ 。

上边是一个连续模式（CCM 模式）的理想工作波形。

下面咱在看一个非连续模式（DCM 模式）的理想工作波形

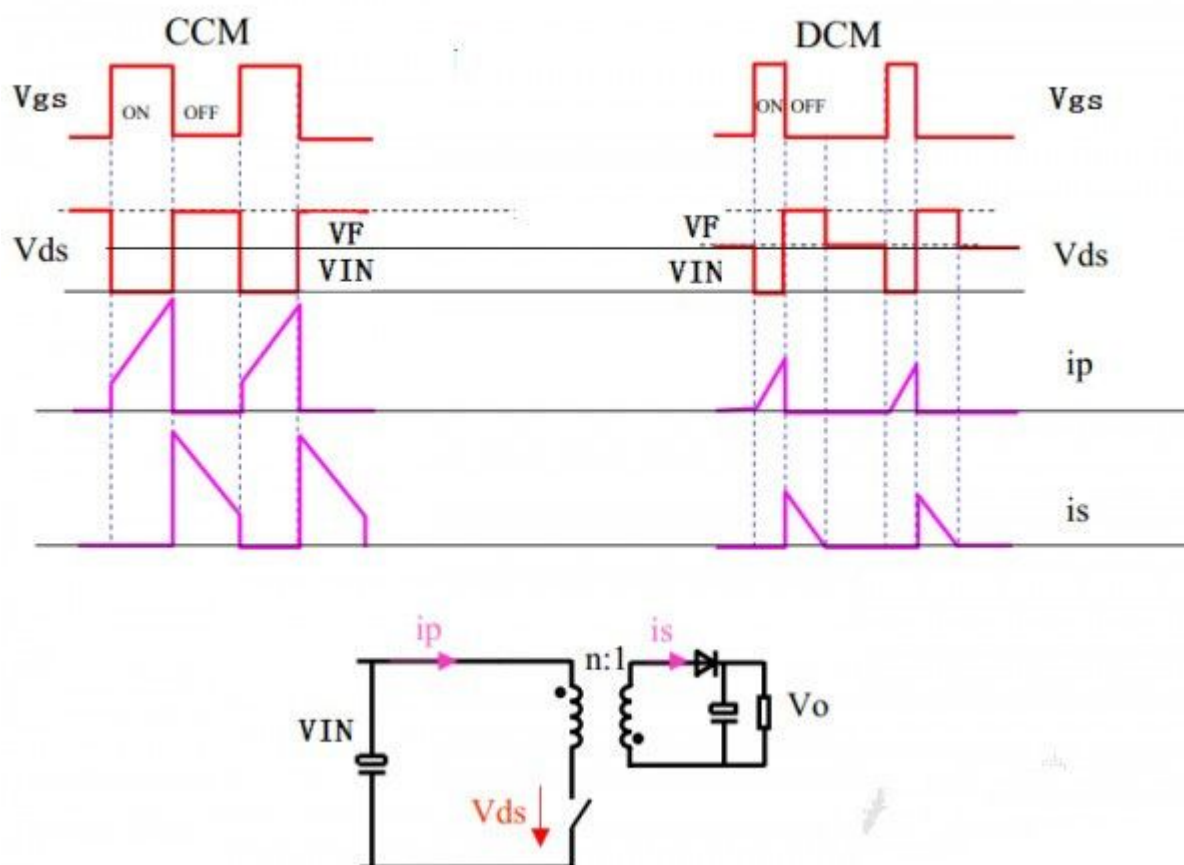


从图上可以看出 DCM 的 V_{ds} 也是由 V_{IN} 和 V_F 组成，只不过有一段时间 V_F 为 0，这段时间是初级电流降为 0，次级电流也降为 0。

那么到底反激变化器怎么区分是工作在连续模式（CCM）还是非连续模式（DCM）？

是看初级电感电流是否降到 0 为分界点吗，NO，反激变换器的 CCM 和 DCM 分界点不是按照初级电感电流是否到 0 来分界的，而是根据初次级的电流是否到 0 来分界的。

如图所示

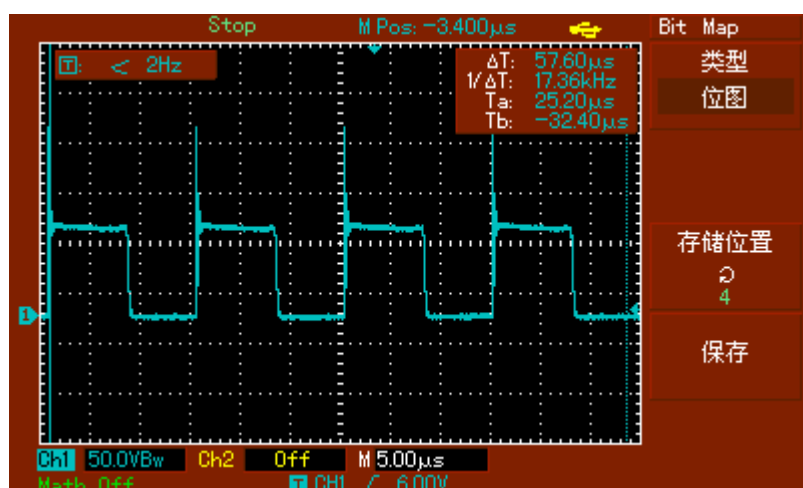


从图上可以看出只要初级电流和次级电流不同时为零，就是连续模式（CCM）；

只要初级电流和次级电流同时为零，便是不连续模式（DCM）；

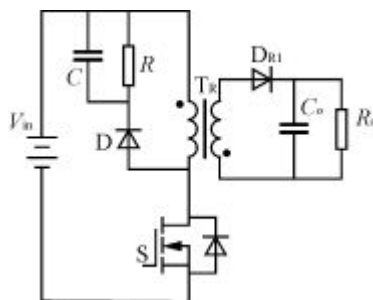
介于这俩之间的是过度模式，也叫临界模式（CRM）。

以上说的都是理想情况，但实际应用中变压器是存在漏感的（漏感的能量是不会耦合到次级的），MOS 管也不是理想的开关，还有 PCB 板的布局及走线带来的杂散电感，使得 MOS 的 V_{ds} 波形往往大于 $V_{IN} + V_F$ 。类似于下图



这个图是一个 48V 入的反激电源。

从图上看到 MOS 的 V_{ds} 有个很大的尖峰，我用的 200V 的 MOS，尖峰到了 196 了。这是尖峰是由于漏感造成的，上边说到漏感的能量不能耦合到次级，那么 MOS 关断的时候，漏感电流也不能突变，所以会产生个很高的感应电动势，因无法耦合到次级，会产生个很高的电压尖峰，可能会超过 MOS 的耐压值而损坏 MOS 管，所以我们实际使用时会在初级加一个 RCD 吸收电路，把尖峰尽可能的吸到最低值，来确保 MOS 管工作在安全电压。具体 RCD 吸收电路图如下

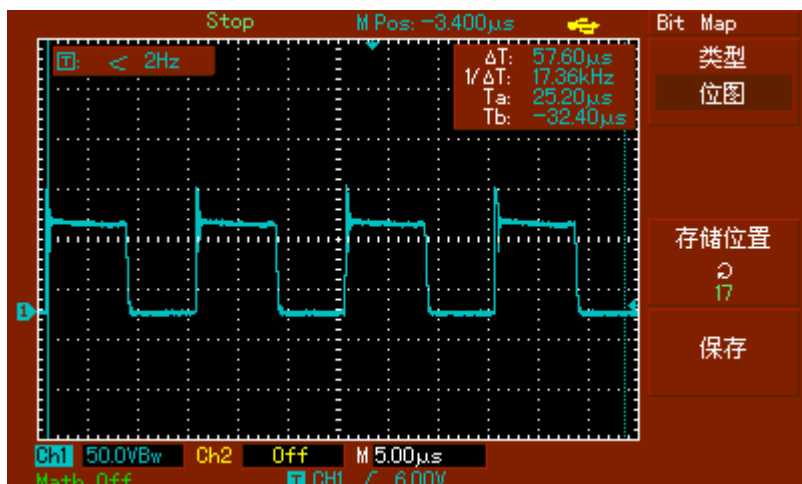


简单分析下工作原理

1. 当开关 S 开通时, 二极管 D 反偏而截至。电感储存能量。

2 当开关 S 关断时，电感电压反向，把漏感能量储存在 C 中，然后通过 R 释放掉。细心的朋友可能会发现，当开关关断的时候，这个 RCD 电路和次级的电路是一模一样的，D 整流，C 滤波。R 相当于负载。只不过输出电压不是 V_0 ，而变成了次级反射到初级的电压 V_F 。所以，注意了，R 的值不能取得太小，太小了损耗严重，影响效率。而且电阻的功率会变的很大！

下边来个加了 RCD 吸收的波形



关于 RCD 吸收的选取网上有很多文章，在以后我会介绍下！

面讲下变压器的设计方法！

变压器的设计方法有多种，个人感觉适合自己的才是最好的，选择一个你自己最熟悉的，能够理解的才是最好的！

我先介绍下一种设计方法：

1. 先确定输入电压，一般是按照最低输入直流电压计算 V_{INmin} 计算

A. 要是直流输入按直流的最低输入来计算；

B. 要是输入为交流电，一般对于单相交流整流用电容滤波，直流电压不会超过交流输入电压有效值的 1.4 倍，也不低于 1.2 倍。

列如，全范围交流输入 85-265VAC 的电源，一般按 85VAC 时计算，那 $V_{INmin}=85*1.2=102V$ ，一般会取整数按 100VDC 计算。

2. 确定导通时间 T_{on}

导通时间 $T_{on}=T*D$

T 为周期 $T=1/F$

D 为最大占空比，一般在最低输入电压的时候，D 会最大，保证输出稳定。

注意大的占空比可以降低初级的电流有效值，和 MOS 的导通损耗，但是根据伏秒法则，初级占空比大了，次级的肯定会小，那么次级的峰值电流会变大，电流有效值变大，会导致输出纹波变大！所以，一般单端反激拓扑的占空比选取不要超过 0.5。

而且一般的电流控制模式，占空比大于 0.5 要加斜率补偿的，对调试是个难度。

还有一重要的是你的占空比决定你的匝比，匝比决定啥，嘿嘿，反射电压 V_F ，忘了再去上边看下，再加上你漏感引起的尖峰，最终影响你 MOS 的耐压。占空比越小匝比越小，反射电压 V_F 越低，MOS 的电压应力小。反之 MOS 的电压应力大，所以占空比要考虑好了。要保证再最高电压下你的 V_{DS} 电压在 MOS 的规定电压以下，最好是降额使用，流出足够的余量来！

列如，电源的开关频率为 100K，最低输入时的最大占空比为 0.4，那 $T=1/100000=10\mu S$ ，那么 $T_{on}=0.4*10\mu S=4\mu S$ 。

3. 确定磁芯的有效面积 AE

AE 一般会在磁芯的资料中给出。

4. 计算初级匝数 NP

$$NP = V_{INmin} \cdot T_{on} / \Delta B \cdot AE$$

式中 V_{INmin} 为直流最低输入电压；

T_{on} 为导通时间

AE 为磁芯的有效面积

ΔB 为磁感应强度变化量，这个值和磁芯材质，及温升等有关，一般考经验来选取，在 0.1-0.3 之间，取得越大，余量越小，变压器在极端情况下越容易饱和！俺一般取 0.2。

5. 计算次级匝数 NS

$$NS = (V_o + V_d) \cdot (1-D) \cdot NP / V_{INmin} \cdot D$$

式中 V_o 为输出电压

V_d 为二极管管压降

D 为占空比

NP 为初级匝数

V_{INmin} 为最低输入电压

6. 确定次级整流二极管的应力 VDR

上边算出变压器的初级匝数 NP 和次级匝数 NS 后，就可以得出次级整流二极管的电压应力

$$VDR = (V_{INmax} \cdot NS / NP) + V_{OUT}$$

式中 V_{INmax} 为最大输入电压，要保证在最高输入电压下你的二极管的电压应力不超标。一般算出来的这个 VDR 还要考虑降额使用，所以二极管的耐压要高于这个 VDR 值。

一般还要在整流管上并一个 RC 吸收，从而降低二极管反向回复时间造成的电压尖峰！尤其是 CCM 模式的时候！

7. 确定初级电感量 LP

确定电感量之前我们先看下上边的两个电流图



对于上图是两种工作模式的初级电感电流波形,我加了两个参数 I_{p1} 和 I_{p2} ;

I_{p1} 对应最低输入电流

I_{p2} 对应最高峰值电流

有上边这两个我们也就可以算出平均电流 I_{avg} 了

$$I_{avg} = (I_{p1} + I_{p2}) D_{max} / 2$$

式中 D_{max} 为最大占空比

如果输出功率为 P_{out} , 电源效率为 H , 那么

$$P_{out} / H = V_{INmin} * I_{avg} = V_{INmin} * (I_{p1} + I_{p2}) D_{max} / 2$$

$$\text{得出 } I_{p1} + I_{p2} = 2P_{out} / V_{INmin} * D_{max} * H$$

然后就可以计算 I_{p1} 和 I_{p2} 的值了

对于 DCM 来说, 电流是降到零的, 所以 I_{p1} 为零

对于 CCM 来说 I_{p1} 和 I_{p2} 都是未知数, 又出来个经验选择了, 一般取 $I_{p2} = (2-3) I_{p1}$, 不能取得太小, 太小了会有一个低电流斜率, 虽然这样损耗小点, 但容易使变压器产生磁饱和, 也容易使系统产生震荡! 俺一般取 $I_{p2} = 3I_{p1}$ 。

计算出 I_{p1} 和 I_{p2} 后, 这时候可以计算初级的电感量了

在 T_{on} 内电流的变化量 $\Delta I = I_{p2} - I_{p1}$

$$\text{根据 } (V_{INmin} / L_P) * T_{on} = \Delta I$$

$$\text{得出 } L_P = V_{INmin} * T_{on} / \Delta I$$

到此变压器的初级电感量计算完毕, 变压器的参数也计算完毕!

还有一种计算方法，就是按照上边的确定初级电感量的方法先确定电感量，然后来选择磁芯，选择磁芯的方法有很多种，一般最常用的是 AP 法

这个公式是看资料上的，具体我也没推倒过具体可以看看赵修科老师的那本《开关电源中的磁性元器件》。

式中 L 为初级电感量也就是 LP

Isp 为初级峰值电流 Ip 也就是 ΔI ，

I1L 为满载初级电流有效值，但我往往会把 Isp 和 I1L 看成是一个，都是初级的峰值电流，所以仁者见仁智者见智，大家可以到应用时具体的来微调！

Bmax 为磁感应强度变化量也就是 ΔB . 这个取值和上边一样，取得太大，磁芯小但容易饱和，而取得太小磁芯的体积又很大，所以一般折中取值！而且和频率关系也很大，要是频率很高，建议取小点，因为频率高了损耗也大，变压器大了有利于散热俺经常取 0.2！

$$K1 = J_{\max} * K_o * 10^{-4}$$

其中 Jmax 为最大电流密度 俺一般取 450A/平方厘米。但赵老师书里取得是 420A/平方厘米

Ko 为窗口面积，有的也叫窗口利用率吧，一般取 0.2-0.4，具体要看绕线的结构了，比如加不加挡墙等因素，所以选取时要充分考虑，免得因取得变压器太小，结构要求苛刻而绕不下，导致项目失败！

10^{-4} 是由米变厘米的系数

所以上式整理下可得

$$AP = A_w * A_e = (L_P * I_P^2 * 10^4 / 450 * \Delta B * K_o) ^{4/3} \text{cm}^4$$

计算出了 AP 就可以找到合适的磁芯，然后找到 Ae 再根据式

$$NP = L_P * I_P / \Delta B * A_e$$

$$AP = A_w A_e = \left[\frac{L I_{Sp}}{B_{\max}} \cdot \frac{I_{1L}}{K_1} \right]^{4/3} \text{cm}^4$$

式中 LP 就是上边算得初级电感量

IP 为初级峰值电流

ΔB 为磁感应强度变化量

AE 为磁芯的有效面积

后边的次级匝数 N_S 和次级整流二极管电压应力的确定就和上边的步骤 5 和 6 一样了！

那这两种初级匝数 N_P 的确定方法到底哪个对呢，可以告诉大家都对。根据电磁感应定律：

$$(V_{INmin}/L_P) * T_{on} = I_P$$

$$\text{所以 } V_{INmin} * T_{on} = L * I_P$$

所以这两个从本质上式一样的。

所以个人觉得第一个适合有经验的工程师，可以凭经验来选择变压器，然后来计算变压器参数而第二种适合初学者，先确定变压器再算变压器参数，免得因自己经验不足而走了弯路！

变压器说到这把，以上是自己的个人意见，欢迎大家批评指正。其实设计出来的参数仅供参考，由于变压器的漏感，PCB 的布局，走线等因素会在调试时做微调，最后做出一个最优的、可靠的产品！