

●磁放大器磁芯选型设计

江西大有科技有限公司

技术部

●磁放大器磁芯选型设计

一 磁通量 ϕ 与自感系数 L 的两维性认识

(一) 磁通量

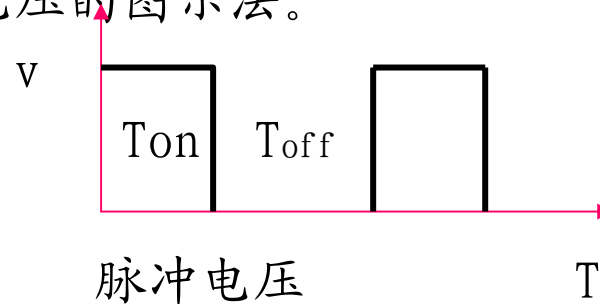
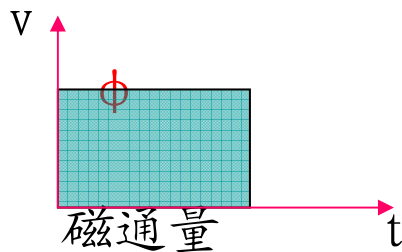
1. 定义: 通过一给定曲面的磁力线数, 称为该曲面的磁通量, 用 ϕ_m 或 ϕ 表示, 单位为韦伯, 符号是 Wb, $Wb=1\text{特斯拉} \cdot \text{米}^2 = 1T \cdot m^2$ 。

2. 磁通量等于电压与时间的乘积, $\phi = V \times t$ 。

根据法拉第电磁感应定律:

$\varepsilon_i = -d\phi/dt$ 。 ε : 伏, ϕ : 韦伯(Wb) t : 秒。

积分后(不计方向的负号)得到 $\phi = V \times t$ 。磁通量等于电压乘时间, 在两维坐标系中Y轴是电压X轴是时间T。乘积就是磁通。下左图为磁通量图示法, 下右图是脉冲电压的图示法。



计算脉冲的平均电压时常用到电压和时间的乘积

$$V_o = (V_p \times t_{on}) / T = V_p \times D$$

磁通 ϕ 的单位是韦伯 (Wb), $1 \text{wb} = 1 \text{伏} \times 1 \text{秒}$, $1 \mu \text{wb} = 1 \text{伏} \times 1 \text{微秒}$ 。

(二) 自感系数L(亦简称电感)

1. 自感系数L定义: 由于回路中电流产生变化引起磁通量变化, 而在回路自身中会激起感应电动势, 此现象称自感现象。

根据毕奥—萨伐尔定律, 磁通量正比回路电流强度即

$\phi \propto I$, 写成等式: $\phi = I \times I$, 当N匝线串联在一起时写成:

$$\psi = N \phi = N \times I \times I = L \times I, \text{ 或写成 } L = \psi / I$$

由法拉第电磁感应定律: $\varepsilon_i = -d\psi/dt = -(L \times dI/dt + I \times dL/dt)$

\therefore 在线圈尺寸、匝数、磁介质导磁率 μ 不变时 $dL/dt = 0$

$\therefore \varepsilon_i = -L \times dI/dt$ 这也是我们非常熟悉的公式。积分并略去负号得到: $V \times t = L \times I$, $(V \times t)/I = L$, 最后得到:

$L = R \times t$, 即电感L等于欧姆乘时间, 在两维坐标系中 Y轴是电阻R, X轴是时间t。乘积便是电感L。1亨利 = 1欧姆 \times 1秒,

1毫亨 = 1欧姆 \times 1毫抄, 1微亨 = 1欧姆 \times 1微秒。

(三) 导磁率 μ

电流产生磁场，但电流在不同的介质中产生的磁感应强度是不一样的，在相同条件下铁磁介质的导磁率要比空气介质大得多。为了表征这种特性，将不同的磁介质用一个系数 μ 来考虑， μ 称为介质的导磁率，它表示物质的导磁能力。在介质中 μ 越大，介质中的磁感应强度 \mathbf{B} 就越大。

在介质中，磁感应强度 \mathbf{B} 与 μ 的比值只与产生磁场的电流有关。在任何介质中，磁场中某一点的 \mathbf{B} 与该点的 μ 的比值定义为该点的磁场强度 \mathbf{H} ，即 $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu$ ，或写成 $\mu = \mathbf{B}/\mathbf{H}$ ， $\mathbf{B} = \mu \times \mathbf{H}$

电感 L 和导磁率 μ 有正比的关系，即 $L = N^2 \times \mu \times (S/l)$ 。

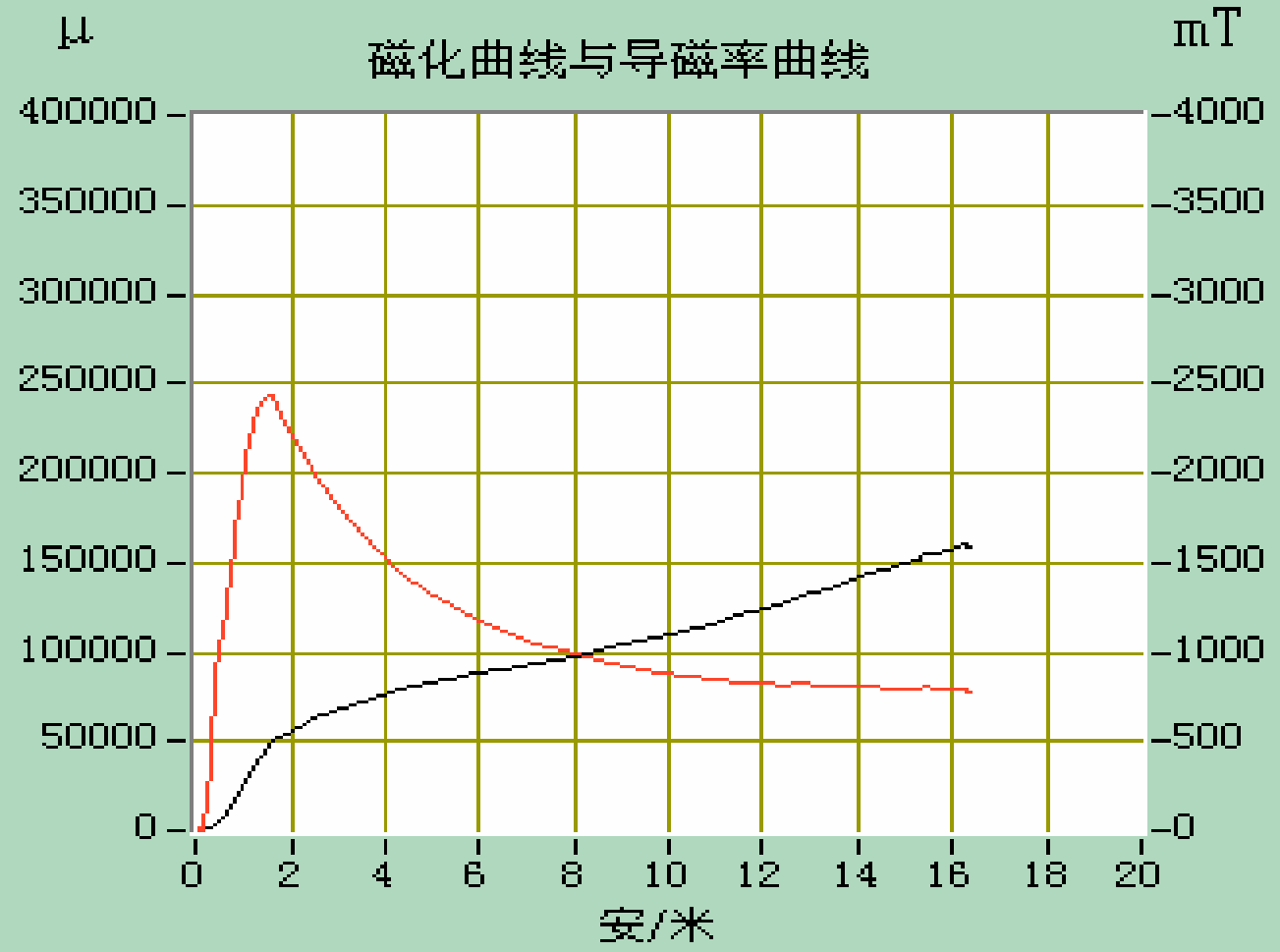
在电路工作可将导磁率 μ 理解为放大倍数，就象晶体管放大倍数 k 一样，它表征晶体管的电流放大能力。那么 μ 放大了什么？可以说它放大了磁感应强度 \mathbf{B} ，不过这个放大系数 μ 有无穷多，对应一个磁场强度 \mathbf{H} 就有一个 μ 并且有 $\mathbf{B}_i = \mu_i \times \mathbf{H}_i$ ，常用的导磁率 μ 就有相对导磁率 μ_r 、最大导磁率 μ_m 、初始导磁率 μ_i 、增量导磁率 μ_Δ 、有效导磁率 μ_e 、幅值导磁率 μ_a 。

下图是一个磁芯磁化曲线和导磁率 μ 曲线，给出了 $H=0.7\text{A/m}$ 时的初始导磁率 μ_i 及最大导磁率 μ_m 。当磁芯工作 μ_m 处时将有最大的电感 L 从而获得最大的阻抗。

Hi 0.07

μ_i 287

μ_m 242343



二 用可饱和磁芯替代(晶体, MOSFET)功率开关管

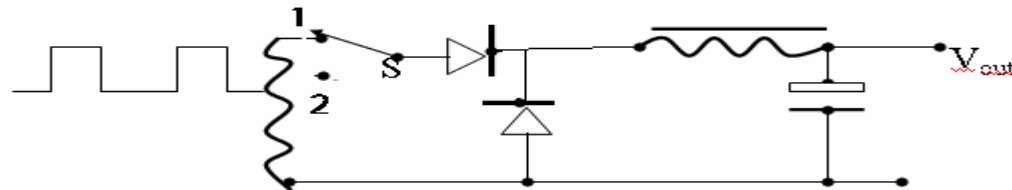
(一) 降压式整流(滤波)电路形式及输出电压表达式

$$V_{out} = V_i * t_{on} / T = V_i * D_m$$

t_{on} 为开关S的开通时间, D_m 为开关S的占空比, 下图接入一开关S, 且在 t_{on} 范围内控制时间, 则上式可写为

$$V_{out} = V_i \times (t_{on} - t_{\tau}) / T \dots\dots\dots (1)$$

t_{τ} 是可以变化的, 从0— t_{on} , 当 t_{τ} 恒定时为稳压电源。S倒向1接通允许脉冲通过, S倒向2时脉冲为零, 对开关S的要求如下: 图(1)



- 1/ 导通时阻抗趋向“零”
- 2/ 关闭时阻抗趋向“无穷大”
- 3/ 开关时间可调
- 4/ 功率损耗小
- 5/ 压降小
- 6/ 开通时间和关断时间小

开关S可以使用功率晶体管和MOS管,由于非晶·纳米晶高导磁率材料的出现,使用可饱和磁芯代替开关功率晶体管不仅可能,而且具有无可比疑的优点:没有击穿电压、其饱和电流承载能力几乎只取决于导线截面积。

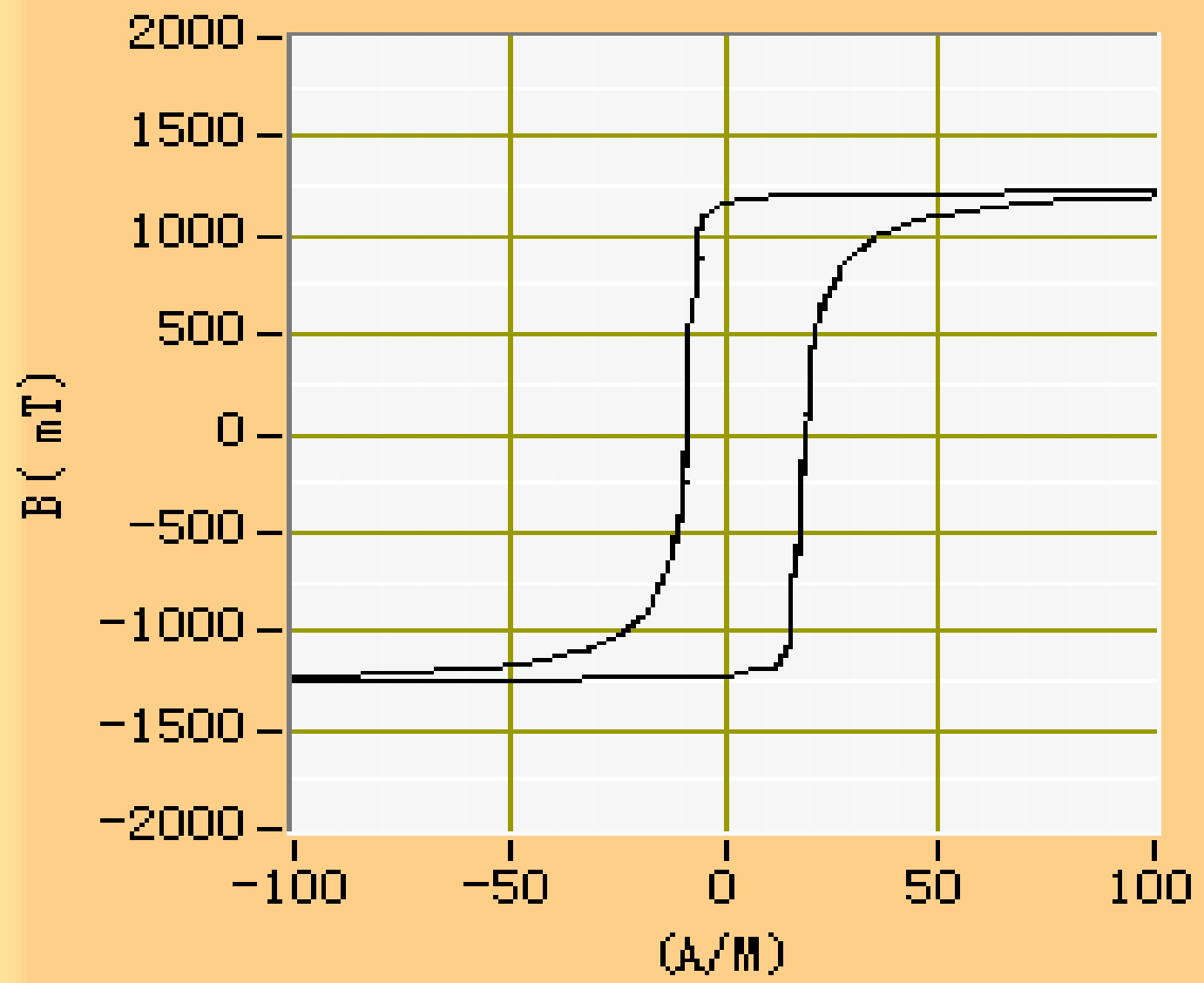
(二) 可饱和磁芯的开关特性。

1/ 磁滞回线的认识。

一只磁芯的磁滞回线一经测绘出,它就包含有 $B_m(B_s)$ 、 B_r , 直方比 B_r/B_m , $2\phi_m$, H_m , 矫顽力 H_c , 功耗 P_c (磁滞回线所包围的面积)

1/ 从下面的B-H磁滞回线图可以看出,回线的左右两边线几乎垂直X轴,因此其导磁率 μ 趋于 ∞ ,此处电感亦趋于 ∞ ,即阻抗趋于 ∞ ,磁芯处在关闭状态——阻抗趋向“无穷大”。对于一只常用的1205磁芯, $A_e=6.3\text{mm}^2$, $A_l=31.4\text{mm}$, $\mu=242343$, $N=7$,则 $L\cong 238$ 亨,频率为10kc其阻抗高达14.9M Ω 。

2/ 回线的上下两边几乎平行X轴,不论磁场如何变比磁感应强度B都不变,即 $dB/dH\approx 0$ 从而 $\mu\approx 0$, $L\approx 0$,阻抗也近似为零,磁芯处在开通状态——阻抗趋向“零”(存在导线电阻)



3/开通时间能调节。

根据 $\phi = V \times t$ ，写成 $t = \phi / V$ ，在电压不变时，调节磁通量 ϕ 就可以调节开通时间 t ， ϕ 的调节是通过磁感强度 B 来达到，磁感应强度 B 的调节是通过选择磁滞回线的工作点来达到 (即通过复位电流来选择工作点)

4/开通时间

由磁滞回线可知，当磁场强度为零时 (通过线圈的电流为零的时刻)，磁芯中存有乘余磁感应强度 B_r ，它是最大磁感应强度 B_s 的 B_r/B_s ，其值常在 92% - 98% 之间，通常希望开通脉冲一旦来到磁芯就进入饱和状态 (即开关的开通状态) 而脉冲来到的瞬间距饱和状态还差 $(1 - B_r/B_s)$ 这么多 (约 2% - 8%)，磁通量也差 $\phi_m \times (1 - B_r/B_s)$ ， N 匝线圈的磁通量就差 $N \times \phi_m \times (1 - B_r/B_s)$ 这么多才到过饱和，磁芯才全开通。令 $N \times \phi_m \times (1 - B_r/B_s) = \Delta \phi$ ，还差 $t_d = \Delta \phi / V$ 这么多时间才开通，所以 t_d 就是开通时间。 (它于 N 、 ϕ_m 、 B_r/B_s 成比例)

例：一只DYC1205a钴基磁芯 $B_m = 559.3 \text{mT}$ ，
 $2 \phi_m = 7.55 \mu \text{Wb}$ ， $B_r/B_m = 0.95$ ， $V = 5 \text{v}$ ， $N = 9$ 求开通 (延迟) 时间

解： $\Delta \phi = N \times 2 \phi_m \times (1 - B_r/B_s) = 3.34 \mu \text{Wb}$ ，

$$t_d = \Delta \phi / V = 3.34 / 5 = 0.66 \mu \text{s}。 \text{当 } B_r/B_s = 0.98 \text{ 时}$$

$$t_d = 9 \times 7.55 \times 0.02 / 5 = 271 \text{ns}$$

5/ 压降

开关磁芯也和晶体管一样存在压降(通常可以忽略)。由于开通延长时间 t_d 的存在必然带来一些电压损失,其大小为:

$$V_d = V \times t_d / T \text{ 或写成}$$

$V_d = V \times \{ [N \phi_m (1 - Br/B_m) / V] / V \} / T = N \phi_m (1 - Br/B_m) \times F$, (F是工作频率), 此电压又称死角电压,于频率成正比。

例: 上例中, F等于30kc, 求 V_d 。

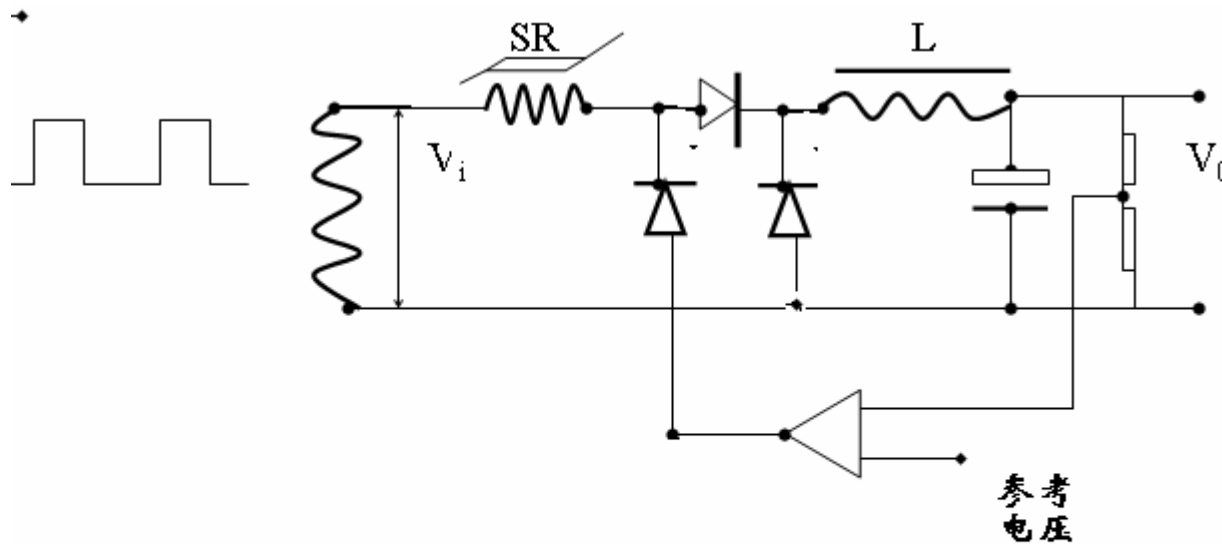
解 $V_d = 3.34(\mu \text{ Wb}) \times 30 \times 10^3 = 3.34(\text{v}) \times 10^{-6}(\mu \text{ s}) \times 30 \times 10^3(\text{hz}) = 0.1\text{v}$ 。

上述五点可知: 一只优秀的饱和磁芯完全具备开关晶体管的性能, 而更具特色的是它不存在耐压击穿、过流烧废等完全问题, 是一个使用方便而安全的开关器件。

三 电压调节器中：磁放大器磁芯选型设计

(一) 设计条件

电路形式：单端正激，半波整流，整流输入电压幅值为 V_i (v)，输出电压 V_0 (v)，输出电流 I_0 (A)，工作频率 F (hz)，佔空比 D_m 。



(二) 决定变压器的次级电压。(依单端正激电路为例)

为使输出电压的调节留有余地, 设富裕系数为 k (通常 k 取0.2), 二极管压降为 V_e , 磁芯压降(死角电压)为 V_d 则变压器次级电压

$$V_i = [V_0(1+k) + V_e + V_d] / D_m \quad . \quad \text{设 } V_0 = 3.3\text{v}, \quad V_e = 0.47\text{v}, \quad V_d = 0.1\text{v}, \\ D_m = 0.45, \quad \text{则 } V_i = 10.06\text{v} \quad \text{取 } 10\text{v}$$

(三) 决定被砍掉的电压 (被磁芯减去的电压) $V_{砍}$

$$\text{由式(1)知: } V_0 = V_i(t_{on} - t_{\tau}) / T = V_i t_{on} / T - V_i t_{\tau} / T = V_i D_m - V_i t_{\tau} / T$$

$$\text{令 } V_{max} = V_i D_m, \quad V_{砍} = V_i t_{\tau} / T \quad \text{则 } V_0 = V_{max} - V_{砍}, \quad V_{砍} = V_{max} - V_0$$

$$\text{即 } V_{砍} = V_i \times t_{\tau} / T = V_{max} - V_0 \dots \dots \dots (2)$$

(2)式便是将由磁芯的作用而减去的电压, 称 $V_{砍}$ 。

(四) 计算磁芯所需的磁通量 $\Delta \phi$

由(2)式可得 $V_{砍} \times T = V_i \times t_{\tau} = V_{砍} / F$, 而 $V_i \times t_{\tau}$ 式子是电压乘时间, 对于磁芯来说直接用磁通量 $\Delta \phi$ 来描述, 即 $\Delta \phi = V_i \times t_{\tau}$, 而

$$V_i \times t_{\tau} = V_{砍} / F, \quad \text{即 } \Delta \phi = V_{砍} / F \dots \dots \dots (3)$$

这就是说: 为了让磁芯能从电路中砍掉(减去)一部分设定的电压而所需的磁通量, 等于所砍掉的电压除以频率 F , 或者说每个脉冲所承担的砍掉电压, 即为磁芯所要产生的、用以抵消部分输入电压而需要的磁通量 $\Delta \phi$ 。

例：电路形式：单端正激，半波整流，L、C滤波， $V_i=10\text{v}$ ， $V_o=3.3\text{v}$ ， $D_m=0.45$ ， $F=30\text{kHz}$ ，求 $\Delta\phi$ 。

解： $V_{\text{砍}}=V_{\text{max}}-V_o=10\times 0.45-3.3=1.2\text{v}$ ，

$$\therefore \Delta\phi = V_{\text{砍}}/F=1.2/30\times 10^3=40(\mu\text{Wb})$$

(五) 决定匝数N

由于单匝线圈的磁通量 $2\phi_m$ (常习贯用 ϕ_m 代表 $2\phi_m$)其数值一般都小于设计要求的磁通量 $\Delta\phi$ 所以必须用多匝，使得

$$N\phi_m \geq \Delta\phi \dots\dots\dots (4)$$

那么匝数N如何决定？

设电路调节量最少有1.2倍到2倍 $\Delta\phi$ ，即磁通量可从零到 $1.2\Delta\phi$ ，或零到 $2\Delta\phi$ 之间调节。

若上例中 $\Delta\phi=40(\mu\text{Wb})$ ， $\phi_m=7.55(\mu\text{Wb})$

则 $N_{\text{min}}=1.2\Delta\phi/\phi_m=48/7.55=6.3$ 匝，取6匝。

$N_{\text{max}}=2\Delta\phi/\phi_m=80/7.55=10.5$ 匝，取11匝。用大匝数磁芯工作正常发生输出欠电压，即电压偏低。优点是能使噪声变小。

(六) 用磁通量表达的输出电压式子

$$V_0 = V_i \times D_m - V_{砍} = V_i \times D_m - V_i t \tau / T = V_i \times D_m - \Delta \phi / T$$

$$= V_i \times D_m - N \phi_m / T \times \varepsilon \dots\dots\dots (5)$$

式(5)就是用磁通量表达输出电压，式中 ε 为反馈系数 $\because N \phi_m > \Delta \phi$
 $\therefore \varepsilon < 0$

(七) 选择磁芯的尺寸。

1/ 先选择内径

磁芯的窗口是用来绕线的，设面积为 W_a ， N 匝导线的截面积只占 W_a 的一部分，设有用系数为 K_f ， $W_a K_f$ 就是用于绕线的面积，称几何面积。设输出电流为 I_0 ，导线电流密度为 j ，每匝截面积为 I_0/j ，绕了 N 匝线，导线总截面为 $N I_0/j$ ，称为物理面积。几何面积应等于物理面积，得到

$$W_a K_f = N I_0 / j, \therefore W_a = N I_0 / j K_f \dots\dots\dots (6)$$

$$(K_f = 0.4, j = 6 \text{ A/mm}^2)$$

W_a 一经确定，磁芯内径面确定了

2/ 选择外径

将(6)式两边各乘以(4)式的两边得到

$$N \phi_m W_a = \Delta \phi N I_0 / j K_f,$$

$$\phi_m W_a = \Delta \phi I_0 / j K_f = \Delta \phi I_0 / 2.4 \dots\dots\dots (7) \text{ 还可写成:}$$

$$\phi_m W_a = \Delta \phi I_0 / 2.4 = V_i \times t \tau \times I_0 / 2.4 = W(\text{功}) / 2.4 \dots\dots (8)$$

$\therefore \phi_m = B_m \times A_e$ (A_e 为有效截面积)

$A_e = (\text{外径} - \text{内径}) \times \text{高度} / 2$, (6)式已决是了内径, 当磁芯高度被选定后, A_e 就确定, 从而外径就被确定了。

式(7)中 $\phi_m W_a$ 是磁芯生产厂家给出的一个指标, 称适用功率, 此指标除包含了内径、外径的含意外, 还包含了可适用的功率, 如(8)式所示。

(八) 决定导线直径D

导线的物理面积为 I_o / j , 导线的几何面积为 $\pi D^2 / 4$

\therefore 导线直径 $D = \sqrt{4 I_o / \pi j}$