

高频变压器设计思路

High-Frequency Transformer Design Ideas

聂应发

田村（中国）企业管理有限公司（惠州分室）

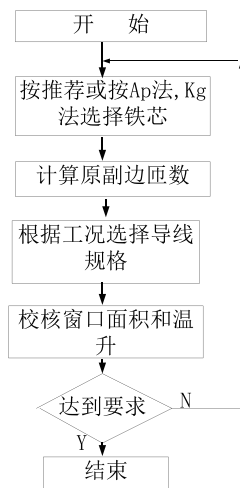
摘要：高频变压器作为开关电源重要组成部分，在开关电源中是进行能量储存和传输的重要部件。作为高频变压器应具有漏感小、线圈分布电容小，各线圈之间的耦合电容也要小的特点。本文阐述通过改善变压器的加工工艺来减小漏感和线圈本身的分布电容，提高开关电源的可靠性。发挥其传输效率高，体积小，质量轻等优点，开发这种电源变压器，需要丰富的理论和实际知识，因此本文拟对以上具体深入地探讨，对于从事高频变压器开发者，有一定的参考价值。

关键词：高频变压器，结构，设计

中国分类号：TM4 文献标识码：B 文章编号：1606-7517(2016)02-6-113

1 常用高频变压器设计方法

1.1 设计基本流程图如下：



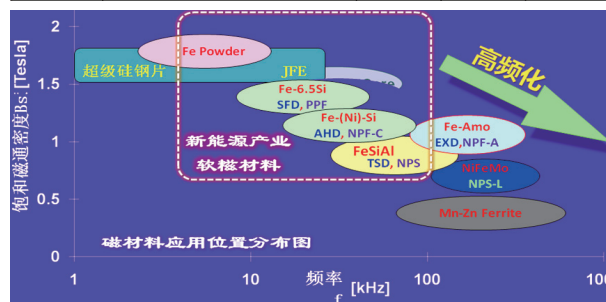
1.2 变压器磁设计和结构设计分析：

	类型	特点	电路类型	设计内容
磁 设计	电感储能型脉冲变压器	单向激磁,工作在B-H曲线第一象限	反激式变换器 正激式变换器	1.磁心规格 2.匝数与导线规格 3.校核损耗和温升 多股漆包线或扁平线,分层或分段 按绝缘设计端子空间
	双极性变压器	双向激磁,工作在B-H曲线第二象限	桥式,推挽式	
线圈结构设计	导线结构	取决于趋肤效应的影响 影响分布参数	所有的电路类型	
	绕组结构			
	端空结构	取决于爬电距离		

1.3 各种磁芯分类：

根据工作频率高低来确定材料

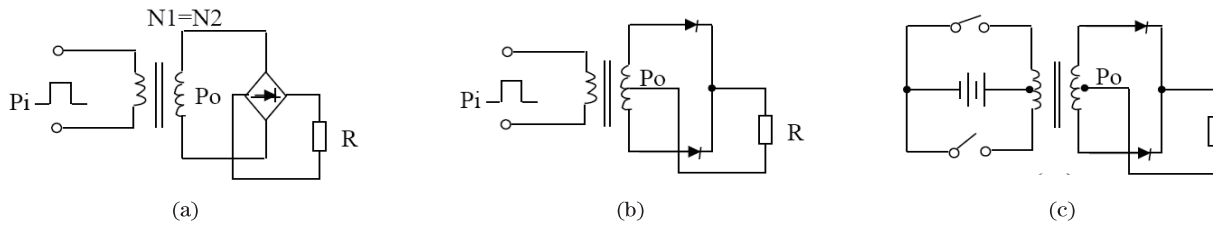
分类	材料名称	相对导磁率	磁通密度(T)	频率(kHz)
金属铁芯	硅钢片(Si-Fe)	~1800	2.0	<2
	坡莫合金(Ni-Fe)	~20,000	0.75	<10
	钴铁合金(Co-Fe)、	~800	2.45	<10
	非晶或超微晶合金(Fe\Co)	~100,000	1.5	~100
铁粉磁芯	碳基铁粉芯(C-Fe)	3~20	~0.9	~300,000
	铝硅铁粉芯(Al-Si-Fe)	10~80	~0.9	~1,000
	钼坡莫合金铁粉芯(Mo-Ni-Fe)	14~145	~0.8	~300
铁氧体磁芯	锰锌铁氧体(Mn-Zn-Fe)	1,000~18,000	~0.5	~1,000
	镍芯铁氧体(Ni-Zn-Fe)	15~500	~0.3	~200,000
	镁芯铁氧体(Mg-Zn-Fe)	300~1,500	~0.3	~25,000



1.4 功率计算方法

计算视在功率 P_T 。

视在功率 P_T 因工作电路不同而别，如下图：



视在功率与线路结构关系

线路(a) $P_T = P_o \left(1 + \frac{1}{\eta} \right)$

线路(b) $P_T = P_o \left(\frac{1}{\eta} + \sqrt{2} \right)$

线路(c) $P_T = P_o \left(\frac{1}{\eta} + 1 \right)$

1.5 AP 计算方法及常用参数

$$AP = \left(\frac{P_T \times 10^4}{K_o K_f F_s B_w K_j} \right) \frac{1}{1 + X}$$

式中：

AP——为 A_w 和 A_e 两面积乘积(cm^4)；

P_T ——变压器视在功率(w)；

B_w ——工作磁通密度(T)；

F_s ——开关工作频率(Hz)；

K_o ——窗口使用系数，一般取0.4；

K_f ——波形系数，方波 $K_f=4.0$ ，正弦波 $K_f=4.44$ ；

K_j ——电流密度比例系数；

X ——与磁芯有关常数。

各种磁芯结构常数如下表：

铁芯种类	损耗	K_j (允许温升25℃)	K_j (允许温升50℃)	X	K_s	K_w	K_v
一般罐形(配线)磁芯	$P_{cu} = P_{fe}$	433	632	-0.17	33.8	48	14.5
铁粉磁芯	$P_{cu} > P_{fe}$	403	590	-0.12	32.5	58.8	13.1
C型铁芯	$P_{cu} = P_{fe}$	323	468	-0.14	39.2	66.6	17.9
单线圈	$P_{cu} > P_{fe}$	395	569	-0.14	44.5	76.6	25.6
金属叠片磁芯	$P_{cu} = P_{fe}$	366	534	-0.12	41.3	68.2	19.7
带绕铁芯	$P_{cu} = P_{fe}$	250	365	-0.13	50.9	82.3	25

$J = K_j AP^X$

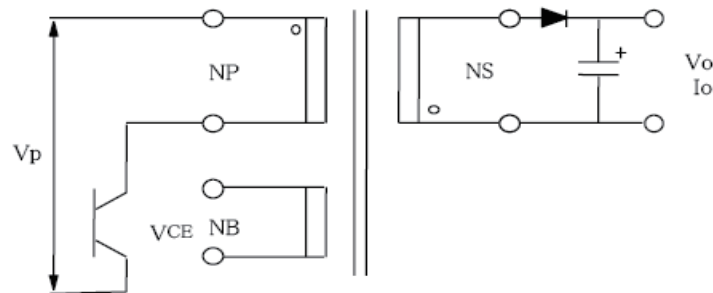
$V_{01} = K_v AP^{0.75}$

$W_t = K_w AP^{0.75}$

$A_s = K_s AP^{0.5}$

1.6 常用小功率反激式高频变压器计算方法

设计方法



1次巻線決定 Np

$$N_p = \frac{V_p \text{ min} \times T_{on}}{A_e \times \Delta B} \times 10^8$$

ΔB は2000~2500Gauss設定
 A_e : 磁芯断面積(cm²)

2次巻線決定 Ns

$$N_s = \frac{(V_o + V_F) \times N_p}{V_{pmin} \times \frac{T_{on}}{T_{off}}}$$

V_F : 二极管的电压降
无指定场合为1V。
正确为目录品参照。

反馈巻線決定 NB

$$N_B = \frac{V_B \times N_P}{V_{pmin}}$$

1次平均電流 Ip(A)

$$\bar{I}_p = \frac{\sum V_o \times I_o}{V_{pmin} \times \eta} \quad \eta: \text{效率}$$

2次実効電流 Isrms(A)

$$I_{srms} = \frac{2T}{T_{off}} \times I_o \times \sqrt{\frac{T_{off}}{3T}}$$

1次尖波電流Icp(A)

$$I_{cp} = \frac{\bar{I}_p \times 2}{\frac{T_{on}}{T}}$$

AL-Value (nH)

$$AL = \frac{L_p}{N_p^2} \times 10^9$$

1次电感 Lp(H)

$$L_p = \frac{V_{pmin}}{I_{cp}} \times T_{on}$$

1次実効電流 Iprms(A)

$$I_{prms} = I_{cp} \times \sqrt{\frac{T_{on}}{3T}}$$

2 高频变压器主要参数及如何控制。

2.1 初级线圈的漏感和分布电容分析

在高频变压器设计时,变压器的漏感和分布电容必须减至最小,因为开关电源中高频变压器传输的是高频脉冲方波信号。在传输的瞬变过程中,漏感和分布电容会引起浪涌电流和尖峰电压,以及顶部振荡,造成损耗增加。虽然在开关晶体管的漏极上增加钳位和吸收电路可以克服尖峰电压,但过大的尖峰会导导致钳位和吸收电路损耗的增加,使开关电源的效率降低,严重时会导致功率开关管的损坏。通常变压器的漏感,控制为初级电感量的1%~3%。

2.1.1 初级线圈的漏感

变压器的漏感是由于初级线圈和次级线圈之间,层与层之间,匝与匝之间磁通没有完全耦合而造成的。在变压器绕制加工中可采取下列措施。

(1) 尽量减少绕组的匝数,选用高饱和磁感应强度、低损耗的磁性材料。

(2) 增加线圈尺寸的高度和宽度之比。

(3) 尽可能减小绕组间的绝缘厚度,但必须保证变压器本身有足够绝缘强度。

(4) 采用分层交叉绕制方式绕制初级、次级绕组。

(5) 采用环型磁心变压器时,不管初级、次级绕组的匝数有多少,在绕制绕组时,均沿环型圆周均匀分布地绕制。对于大电流工作状态下的环型磁心变压器,采用多绕组并联方式绕制,并且尽可能地减小线径。

(6) 改善线圈之间的耦合程度。

(7) 在输入电压不太高的情况下,初级、次级绕组采用双线并绕的加工工艺。

其中减少初级线圈的匝数及增加线圈尺寸的高度和宽度之比,与所选择的磁心形状有关。如果磁心放置线圈的心柱尺寸足够大,足以能使初级绕成两层,甚至绕成一层的话,就可以有效地减小初级的漏感及分布电容的值。高频变压器适于采用中间心柱较长的磁心,不适合采用矮胖形状的磁心。在上述措施中变压器绕组的匝数不能减得太少,否则当输入电压太高,或者脉冲太宽时,会引起磁心饱和,导致变压器绕组的电感值急剧降低,绕组对交流电流的限流作用降低,严重时进入短路状态,在微秒的时间里,有几十乃至几百安培的电流通过半导体器件,使之失效。

2.1.2 分布电容

变压器绕组线匝之间,同一绕组的上、下层之间,不同绕组之间,绕组与屏蔽层(或磁心)之间形成的电容称为分布电容。开关电源分布电容主要由下面几部分组成。

(1) 各绕组与屏蔽层(或磁心)之间的分布电容。

(2) 各绕组线匝之间的分布电容。

(3) 绕组与绕组之间的分布电容。

(4) 各绕组的上、下层之间的分布电容。

在开关电源的晶体管通、断期间,线圈的分布电容被反复地充电和放电,其能量都被钳位和吸收电路所消耗,降低了开关电源的效率。此外,线圈的分布电容还与线圈的漏感一起形成LC振荡,产生振铃噪声。要减小分布电容可以采取下列措施:

(1) 绕组进行分段绕制;

(2) 正确安排绕组的极性,以减小各绕组之间的电位差;

(3) 初级、次级绕组之间增加静电屏蔽措施;

(4) 选择漏磁势组数 $M=4$ 。

2.2 绕组设计制作

2.2.1 初级绕组

初级绕组应放在最里层,这样可使变压器初级绕组每一匝用线长度最短,从而使整个绕组的用线为最少,这有效地减小了初级绕组自身的分布电容。在通常情况下,变压器的初级绕组被设计成两层以下的绕组,可使变压器的漏感为最小。

初级绕组放在最里面,使初级绕组得到了其他绕组的屏蔽,有助于减小变压器初级绕组和邻近器件之间电磁噪声的相互耦合。

初级绕组放在最里面,使初级绕组的起始端作为连接开关电源功率晶体管的漏极或集电极驱动端,可减少变压器初级对开关电源其他部分电磁骚扰的耦合。

2.2.2 次级绕组

初级绕组绕完,要加绕(3~5)层绝缘垫衬再绕制次级绕组。这样可减小初级绕组和次级绕组之间分布电容的容量,也增大了初级和次级之间的绝缘强度,符合绝缘耐压的要求。减小变压器初级和次级之间的电容有利于减小开关电源输出端的共模骚扰。如果开关电源的次级有多路输出,并且输出之间是不共地的,为了减小漏感,让功率

最大的次级靠近变压器的初级绕组。如果这个次级绕组只有相对较少几匝，则为了改进耦合情况，还是应当设法将它布满完整的一层，如可以采用多根导线并联的办法，有助于改进次级绕组的填充系数。其他次级绕组紧密的绕在这个次级绕组的上面。当开关电源多路输出采用共地技术时，处理方法简单一些。次级可以采用变压器抽头形式输出，次级绕组间不需要采取绝缘隔离，从而使变压器的绕制更加紧凑，变压器的磁耦合得到加强，能够改善轻载时的稳压性能。

2.2.3 偏压绕组

偏压绕组绕在初级和次级之间，还是绕在最外层，和开关电源的调整是根据次级电压还是初级电压进行有关。如果电压调整是根据次级来进行的，则偏压绕组应放在初级和次级之间，这样有助于减少电源产生的传导骚扰发射。如果电压调整是根据初级来进行的，则偏压绕组应绕在变压器的最外层，这可使偏压绕组和次级绕组之间保持最大的耦合，而与初级绕组之间的耦合减至最小。初级偏压绕

组最好能布满完整的一层，如果偏压绕组的匝数很少，则可以采取加粗偏压绕组的线径，或者用多根导线并联绕制，改进偏压绕组的填充情况。这一改进措施实际上也改进了采用次级电压来调节电源的屏蔽能力，同样也改进了采用初级电压来调节电源时，次级绕组对偏压绕组的耦合情况。

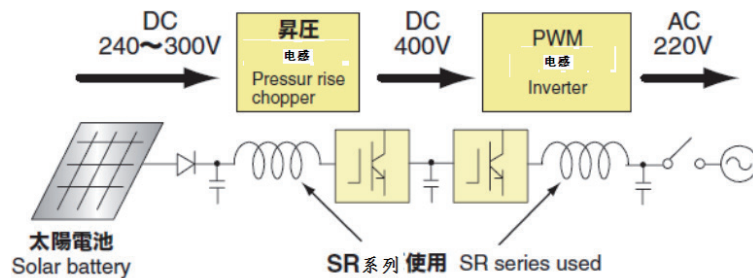
3 开关电源主要包括主回路和控制回路两大部分

3.1 主回路是指开关电源中功率电流流经的通路

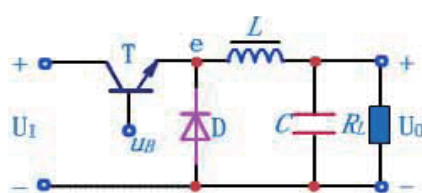
主回路一般包含了开关电源中的开关器件、储能器件、脉冲变压器、滤波器、输出整流器等所有功率器件，以及供电输入端和负载端。控制回路一般采用 PWM 控制方式，通过输出信号和基准的比较来控制主回路中的开关器件。

3.2 开关电源主回路可以分为隔离式与非隔离式两大类型。

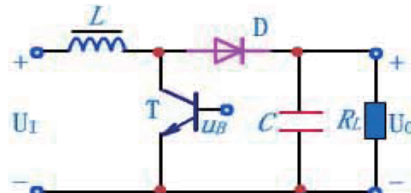
3.2.1 非隔离式拓扑BUCK降压式，BOOST升压式，BUCK-BOOST反转式 (见下图)



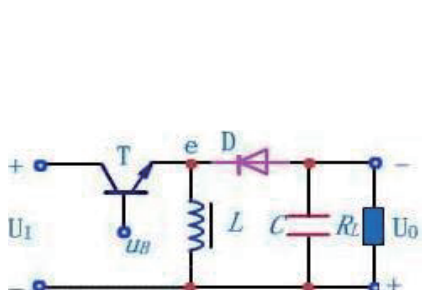
3.2.2 隔离式拓扑：正激式；反激式；半桥式；推挽式；全桥式



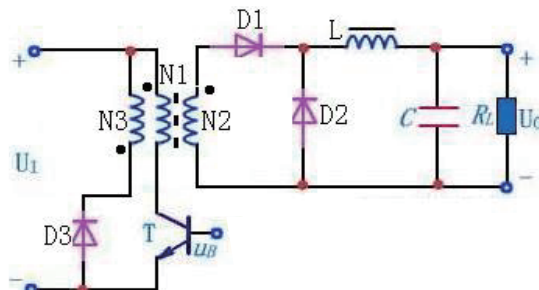
串联型开关稳压电路主回路



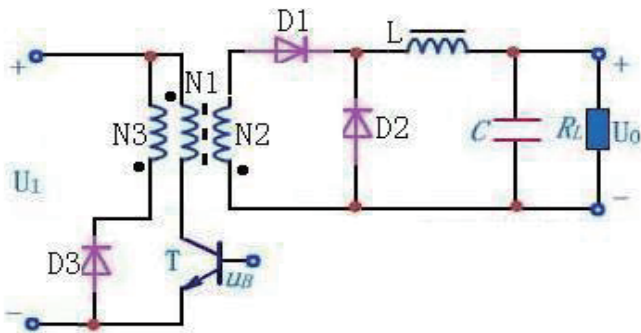
并联型开关稳压电路主回路



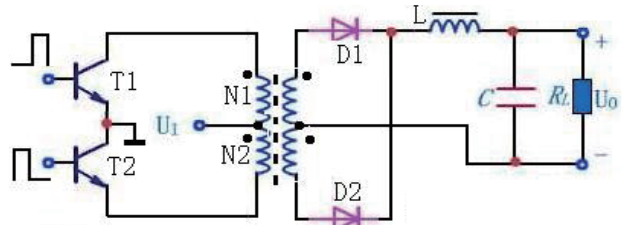
极性反转型换电路



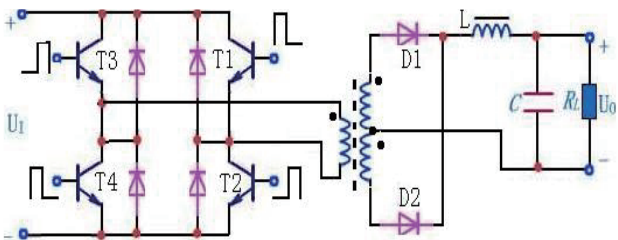
单端正激式开关电源主回路



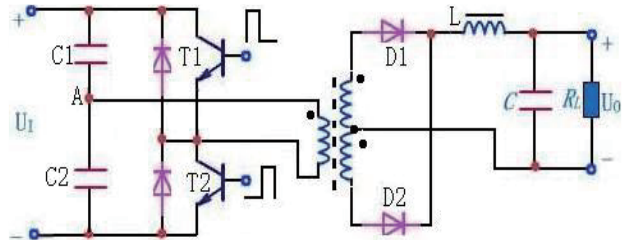
单端反激式开关电源主回路



推挽式换能电路



全桥式开关电源主回路



半桥式开关电源主回路

3.3 常用单管 DC/DC 电源变换器计算方法 (待续)

上接112页

- [5] 戴卫力, 费峻涛, 肖建康, 等. 无线电能传输技术综述及应用前景. 电气技术. 2010 年第 7 期.
- [6] 朱俊. 电动汽车的无线充电技术. 汽车工程师. 2011 (12).
- [7] Chwei-Sen Wang, Grant A.Covic, Oskar H.Stielau. Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2004, 51 (1):148-157.
- [8] K.W.E.Cheng, Lu,Y. Development of a Contactless Power Converter, IEEE International Conference on Industrial Technology, 2002 (2): 786-791.
- [9] 王洪博, 朱轶智, 杨军, 等. 无线供电技术的发展和前景. 电信技术, 2012 (9): 56-59.
- [10] 傅文珍, 张波, 丘东元. 频率跟踪式谐振耦合电能无线传输系

统研究. 第三届中国高校电力电子与电力传动学术年会. 北京. 2009, 4.

作者简介

黄天祥, 男, 硕士研究生, 专业: 电力电子与电力传动, 研究方向: 无线电能传输, 邮箱: 771989565@qq.com, 联系电话: 18649805367, 地址: 福州市闽侯县福州大学电气学院, 邮编: 350108;

董纪清, 女, 博士、副教授, 研究方向为电力电子功率变换、高频磁技术、电磁兼容等;

陈为, 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子功率变换、高频磁技术、电磁兼容诊断与滤波器、磁集成、电磁场分析与应用和电磁检测等。