

# 功率电感介绍及设计思路

## Power Inductors introduce and design ideas

聂应发

田村(中国)企业管理有限公司(惠州分公司),惠州

**摘要:** 功率电感作为电源重要组成部分,它在电源中是进行能量储存和传输的重要部件。同一电感对不同变化频率的电流阻碍效果不一样,其总体规律是:通低频,阻高频的特点。本文阐述通过功率电感使用原理及特性,分类及应用分析,设计及材质选择,及功率电感发展方向。要开发此功率电感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,对于从事功率电感开发者,有一定的参考价值。

**关键词:** 功率电感,参数,结构,设计

电感在电路中电流发生变化时能产生电动势的性质称为电感,电感又分为自感和互感。自感是当线圈中有电流通过时,线圈的周围就会产生磁场。当线圈中电流发生变化时,其周围的磁场也产生相应的变化,此变化的磁场可使线圈自身产生感应电动势(电动势用以表示有源元件理想电源的端电压)。互感是两个电感线圈相互靠近时,一个电感线圈的磁场变化将影响另一个电感线圈。互感的大小取决于电感线圈的自感与两个电感线圈耦合的程度。利用电感的特性应制造电感器作用是对交流信号进行隔离、滤波或与电容器、电阻器等组成谐振电路,制造出变压器起到隔离或改变电压作用,制造电动机做设备的动力。

电感又称扼流器、电抗器、动态电抗器。与电容器、电阻器一起被称为三大被动元件,继电容器、电阻器之后迅速发展实现片式化的元件。用金属导线做成线圈,流经线圈的电流发生变化时,会产生很明显的电磁感应现象,线圈自感应反向电动势阻碍电流的变化,起到平稳电流的作用。具体地,如果电感器在没有电流通过的状态下,电路接通时它将试图阻碍电流流过它;如果电感器在有电流通过的状态下,电路断开时它将试图维持电流不变。从能量角度看就是,电感器能把电能转储为磁能,把磁能释放为电能。同一电感器对不同变化频率的电流阻碍效果不一样,其总体规律是:通低频,阻高频。

1、阻流作用:线圈中的自感电动势总是与线圈中的电流变化相对抗。主要可分为高频阻流线圈及低频阻流线圈。

2、调谐与选频作用:电感线圈与电容器并联可组成

LC调谐电路。谐振时由于电路的感抗与容抗等值又反向,因此回路总电流的感抗最小,电流量最大(指 $f=f_0$ 的交流信号),所以LC谐振电路具有选择频率的作用,能将某一频率 $f$ 的交流信号选择出来。

## 1 电感器主要性能参数

### 1.1 电感量 $L_s$

电感量也称自感系数,是表示当流经电感器的电流发生变化时,其产生自感应能力的一个物理量。电感量的大小反映了元件存、释能量的强弱。

电感量是电感器本身固有特性,取决于线圈匝数、绕制方式、磁芯材料等。

$$\text{公式: } L_s = \frac{k \times \mu \times N^2 \times S}{L}$$

其中: $\mu$ 为磁芯的相对磁导率; $k$ :常数; $u$ :磁导率(由磁体材料决定) $N$ :圈数(根据设计); $S$ :有效面积(根据设计); $l$ :磁路的长度(根据设计) $N$ 为线圈圈数的平方; $S$ 线圈的截面积,单位为 $m^2$ ;  $L$ 线圈的长度,单位为 $m$

$k$ 经验系数

从公式可知:线圈圈数越多、绕制的线圈越密集,电感量就越大。有磁芯的线圈比无磁芯的线圈电感量大;磁芯导磁率越大的线圈,电感量也越大。电感量的基本单位是亨利(亨),用字母“H”表示。常用单位毫亨(mH)、微亨( $\mu H$ )、纳亨(nH)。

换算关系为:  $1H=10^3mH=10^6\mu H=10^9nH$

片式电感器电感量范围

电感器类别	磁芯材料	电感量范围
多层片式	铁氧体	47nH~100uH
多层片式	常规陶瓷	1nH~470nH
绕线片式	铁氧体	10nH~1000uH
绕线片式	常规陶瓷	1nH~33uH

### 1.2 电感量允许误差

允许偏差是指电感器上标称的电感量与实际电感的允许误差值。

用于振荡或滤波等电路中的电感器要求精度较高，允许偏差为  $\pm 0.2\% \sim \pm 0.5\%$ ；

用于耦合、高频阻流等线圈的精度要求不高，允许偏差为  $\pm 10\% \sim \pm 20\%$ 。

### 1.3 感抗 $X_L$

电感线圈对交流电流阻碍作用的大小称感抗  $X_L$ ，单位是欧姆。它与电感量  $L$  和交流电频率  $f$  的关系为  $X_L = 2\pi fL$ 。

### 1.4 品质因素 $Q$

品质因素  $Q$  是表征电感器质量的一个主要参量。

$Q$  为电感器在某一频率的交流电压下工作时，感抗  $X_L$  与其等效的电阻的比值：

公式： $Q = X_L / R$  因  $X_L$  与频率有关，所以  $Q$  值与频率相关。常见  $Q$ - $F$  曲线为钟形。

电感器的  $Q$  值高低与线圈导线的直流电阻，磁芯介质损耗，屏蔽罩或铁芯引起的损耗，高频趋肤效应的影响等因素有关。 $Q$  值反映元件工作时所做的有用功与其本身消耗的能量比例关系，电感器  $Q$  值越高，回路的损耗越小，效率越高。电感器的  $Q$  值通常为几十到几百。接收、发射模块中的耦合、调谐电路对  $Q$  值要求高，滤波电路  $Q$  值要求低。

### 1.5 自谐振频率 $SRF$

电感器的寄生电容与电感量发生谐振的频率点，记为  $F_{SR}$ 。

在  $F_{SR}$  下，电感感抗与寄生电容容抗相等并互相抵消，整体表现为电抗为 0， $F_{SR}$  处电感失去储能能力表现出高阻的纯阻特性。即  $F_{SR}$  处， $Q=0$ 。公式： $F_{SR} = [2\pi(LC)]^{-1/2}$

### 1.6 寄生电容

是指线圈的匝与匝之间，线圈与磁芯之间，线圈与地之间，线圈与金属之间都存在的电容。电感器的寄生电容越小，其稳定性越好，寄生电容的存在使线圈的  $Q$  值减小，稳定性变差，因而线圈的寄生电容越小越好。

### 1.7 直流电阻 $R_{dc}$

直流电阻——直流状态下测量元件的电阻值，单位为欧姆。表征元件内部线圈的质量状况，符合欧姆定律。在电感设计中，都要求直流电阻隔尽可能的小。通常标称为最大值。

### 1.8 额定电流 $I_r$

额定电流是指电感器在允许的工作环境下能承受的最大电流值。电流通过会引起元件发热，元件温升电感量会下降，取元件电感量下降 5% 或器件温升 20℃ 的电流值为额定电流。若工作电流超过额定电流，则电感器就会因发热而使性能参数发生改变，甚至还会因过流而烧毁。额定电流为其允许的最大工作电流，同系列产品，电感量增大，额定电流减少。对非磁性磁芯电感器来说，额定电流取决于直流电阻，直流电阻越小则温升越小，容许电流越大。

### 1.9 贴片型电感器对比

产品分类 对比项	多层片式 电感器	绕线片式 电感器	薄膜片式 电感器
制造关键 工艺	印刷多层 高温烧结	磁芯上 绕线圈	沉积薄膜 光刻图形
电感量范围	电感量较小 nH~uH 级	电感量宽广 可达 mH ~ H	范围窄小 电感量较小
精度	较低	电感量精度高	高
Q 值	Q 值较低 40~70	高 Q 值	高频保持高 Q
耐电流	<0.5A	大电流 可达 0.5A	较小
磁屏蔽性	磁屏蔽好 漏磁少	非磁屏蔽 漏磁多	内电极集中 磁场分布集中
成本	低	较高	很高
体积	小	大	小
主要应用	信号处理 抑制干扰	信号处理、 电源管理、 高频回路	高频微波场合 100MHz 以上

## 2 功率电感设计及材质选择

### 2.1 功率电感分类

从磁路可分为：开磁路电感：不能包容所有由绕线电感所产生之磁通量的磁性铁芯形状，可能会对周边其他组件产生；闭磁路电感：具有能完全包容所有由绕线电感所产生之磁通量的磁性铁芯形状皆可被认为是具闭合型的不会对周边其他组件产生 EMI(电磁干扰)问题。

从结构上可分为：空心线圈电感，带有磁芯的电感，插件及贴片电感。

从功率上可分为：大功率，小功率（与电感体积，磁芯材质有关，体积越大功率也就越大）。

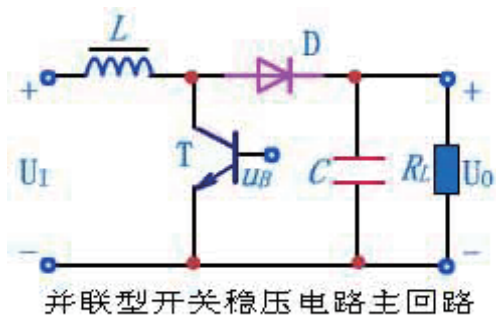
从频率上可分为：高频，低频（与磁芯材质有关，空心线圈适合用在高频）。

## 2.2 功率电感应用分析

功率电感主要应用在电子电器产品电源端，起 DC-DC/AC-DC 转换，在电路中常三种用法，升压电路、降压电路、反向。

### 2.2.1 升压电路原理

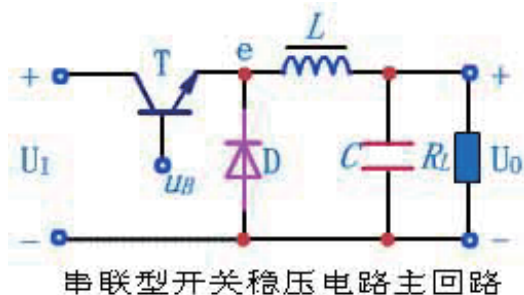
电感在升压电路的作用：是将电能和磁场能相互转换的能量转换器件，当开关管闭合后，电感将电能转换为磁场能储存起来，当断开后电感将储存的磁场能转换为电场能，且这个能量在输入电源电压叠加后通过二极管和电容的滤波后得到平滑的直流电压提供给负载，由于这个电压是输入电源电压和电感的磁能转换为电能的叠加后形成的，所以输出电压高于输入电压，即升压过程的完成。



### 2.2.2 降压电路原理

一开始开关断开，电路没有电流通过，电感不会产生自感，也就不会产生电动势。当开关导通时，输入电压经开关、储能电感 L 和电容 C 或负载电阻 R<sub>2</sub> 构成回路，电源通过开关 D、电感 L 给负载供电，并将部分电能储存在电感 L 以及电容 C 中，L 以磁场的形式储存电能。充电电流不但在 C 两端建立直流电压，而且在储能电感 L 上产生左正、右负的电动势。由于电感 L 的自感，在开关接通后，电流增大得比较缓慢，即输出不能立刻达到电源电压值。一定时间后，开关断开时，电感产生反向电动势，由于电感 L 的自感作用，将保持电路中的电流不变，即从左往右继续流。这电流流过负载，从地线返回，流到续流二极管

D 的正极，经过二极管 D，返回电感 L 的左端，从而形成了一个回路。开关断开一段时间，由于储能电感 L 中的电流不能突变，电感释放能量，电路中二极管的接入正好和反向电动势方向一致，把反向电势通过续流二极管形成回路以电流的形式中和掉，因而电感的电压持续下降，以致维持电流不变。因此实现电感降压。



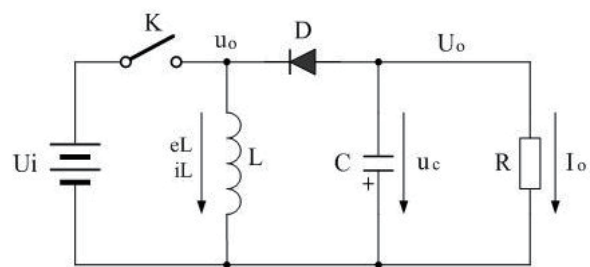
### 2.2.3 BUCK-BOOST 拓扑的精简模型

BUCK-BOOST 输出的是一个反极性的电压

输出电压的产生：当 K 接通的时候， $U_i$  开始对 L 加电，流过 L 的电流开始增加，同时电流在 L 中也要产生磁场；

当 K 由接通转为关断的时候，L 会产生反电动势，使电流继续流动，并通过整流二极管 D 进行整流，再经 C 储能滤波，然后向负载 R 提供电流输出。

控制开关 K 不断地反复接通和关断过程，在负载 R 上就可以得到一个负极性的电压输出。



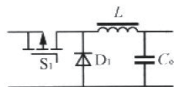
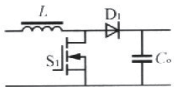
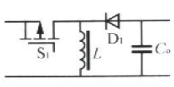
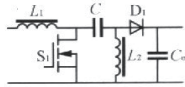
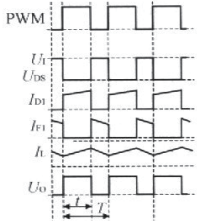
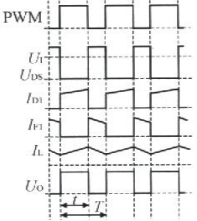
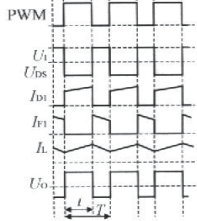
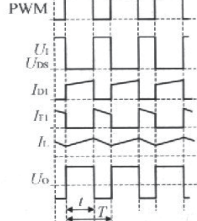
## 3 功率电感设计及材质选择

### 3.1 功率电感设计

#### 3.1.1 在设计电感之前，我们先了解一下功率电感主要参数

a) 电感量 L：电感之电感值会受铁芯之材质，铁芯之形状及尺寸，绕线的圈数及线圈的形状所影响，通常用来表示一电感的电感值，电感值的单位为微亨利 ( $\mu\text{H}$ )，如 47mH 既等于 47000  $\mu\text{H}$ 。

表 1 常见单管 DC/DC 电源变换器

变换器类型	Buck(降压式)	Boost(升压式)	Buck-Boost (降压/升压式,含极 性反转式,即 Inverting 式)	SEPIC (单端一次侧电感式)
电路结构				
理想的 传递函数	$\frac{U_o}{U_i} = \frac{t}{T} = D$	$\frac{U_o}{U_i} = \frac{T}{T-t} = \frac{D}{1-D}$	$\frac{U_o}{U_i} = \frac{t}{T-t} = -\frac{D}{1-D}$	$\frac{U_o}{U_i} = \frac{D}{1-D}$
最大漏极电流	$I_{D(max)}=I_o$	$I_{D(max)}=\left(\frac{D}{1-D}\right)I_o$	$I_{D(max)}=\left(\frac{D}{1-D}\right)I_o$	$I_{D(max)}=\left(\frac{D}{1-D}\right)I_o$
漏极电压	$U_{DS}=U_i$	$U_{DS}=U_o$	$U_{DS}=U_i-U_o$	$U_{DS}=U_i+U_o$
输出二极管 上的电流	$I_{F1}=(1-D)I_o$	$I_{F1}=I_o$	$I_{F1}=I_o$	$I_{F1}=I_o$
输出二极管 的反向电压	$U_{R1}=U_i$	$U_{R1}=U_o$	$U_{R1}=U_i-U_o$	$U_{R1}=U_i+U_o$
电压及 电流波形				
主要特点	$U_o < U_i$	$U_o > U_i$	$U_o < U_i$ 或 $U_o > U_i$ 或 $U_o = -U_i$	电容 C 传输能量,适 用于电池供电的便 携式设备
DC/DC 控制器 的典型产品	MAX758A LM2576/2596 LM2578/2579 AP1501/1507/1509	MAX770/773 UCC3800 TPS6734	LTC3441 UC3572 TPS6755	UCC3800 UCC38C42 TPS61130

\* 频率：交流电在 1s 内完成周期性变化的次数叫做频率，常用 f 表示。频率的单位是赫（Hz），在开关电源中通常指开关切换的频率。

c) 额定电流：允许能通过一电感之连续直流电流强度，此直流电流的强度是基于在该电感在最大的额定环境温度中的最大温升，额定电流与一电感藉由低的直流电阻以降低绕线的能量损失的能力有关，亦与电感驱散绕线的能量损失的能力有关，因此，额定电流可藉着降低直流电阻或增加电感尺寸来提高，对低频的电流波形，其均方根电流值可以用来代替直流额定电流，额定电流与电感的磁特性并无关联。

d) 饱和电流：指流经一电感而使其电感值比零直流偏压时之原电感值下降一特定量的直流偏压电流，通常定义的电感值下降百分比有 10%/20%/30%，因此直流偏压电流而致电感值下降的因素与铁芯的磁性有关。铁芯及其周边的一些空间指可以储存一定量之磁通密度，超过此磁通密度，铁芯的导磁率会降低。因此，电感值会因而下降。铁芯的饱和并不适用于“空心铁芯”的电感。

e) 温升电流：允许能通过一电感之连续直流电流强度，此直流电流的强度是基于在该电感在最大的额定环境温度中的最大温升（通常  $\leq \Delta T=40^\circ\text{C}$ ），温升电流与直流电阻及尺寸有关。温升：在空气中一元件之表面温度因元件内

部能量的释放所造成温度的增加量。

f) 操作温度范围：指元件可以安全运作的环境温度范围，操作温度与储存温度不同，操作温度需把由直流偏压电流所产生的绕线损失致产生的自我温升列入计算，此能量损失为“铜损”，常以其最大值为标注。

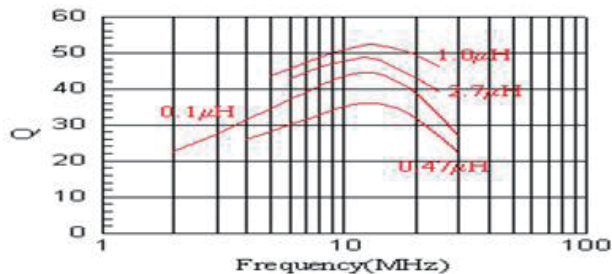
g) 铜损：电流流经线圈所产生之能量损失，此能量损失等于电流大小的平方乘上线圈的电阻 (I<sup>2</sup>R)，这些能量损失转换成热能。

\* 铁损：铁损是由于在铁芯中的变更磁场所造成，这个损失与操作频率及总流动的磁通量有关，总铁损由三个成份组成：磁滞损、涡流损及残留损。这些损失因磁性材料不同而异，在如高功率及高频率切换调整器和 RF 的设计需要小心选择铁芯种类以降低铁损使电感的表现最佳。

h) 涡流损：涡流损同时会出现在电感中的绕线及磁性铁芯中，在绕线(导体)中的涡电流会促进两种形式的损失：邻近效应之损失及表面效应之损失，至于铁损，可视为在一磁场中之磁力线周围的一电场，是由交互的磁通量所产生，如果此磁性铁芯具有导电性，则形成涡电流，因涡电流在一垂直于磁力线方向的平面流动，损失因而产生。

i) 品质系数：电感的品质系数是量测一电感相对损失的指标，它的定义为感抗 (X<sub>L</sub>) 对有效电阻 (R<sub>e</sub>) 之比。R<sub>e</sub> 是有效电阻，是消耗能量的部份，有效电阻由 DCR、表面效应、铁损所贡献；Le 是真实电感扣除分布电容影响后的值，通常以其最小值为标注。客户通常对 Q 值的要求是越高越好，Q 值也是随测试频率而变化的 (Q 值随测试频率的变化关系常用 Q 值的频率曲线来表示)。

$$Q = \frac{X_L}{R_e} = \frac{2\pi fLe}{R_e}$$



### 3.2 功率电感设计步骤

第一步：客人的电路参数 (电感量 L、输入电压 - 输出电压、工作频率、峰值电流、温升)

第二步：选磁芯 (参考工作频率、峰值电流、使用场合)

第三步：粗选磁芯形状及尺寸 (参考电感使用在那类电子产品中)

第四步：计算电感规格

电感的大小可以根据纹波电流计算得到：

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \times V_{OUT}}{V_{IN} \times f_s \times \Delta I_L}$$

( $\Delta I_L$ 取负载电流的30%左右)

• 饱和电流

电感饱和电流一般为电感峰值电流的1.25~1.5倍，如果小于电路的峰值电流，那么电感量就会变小，达不到滤波效果。

$$I_{PEAK} = I_{OUT} + \Delta I_L / 2$$

功率电感在设计时重点在电感磁芯的饱和度及损耗，较大的电感量提供较低的峰值电流和较低的损耗，可以提高效率，还可以减少纹波电流和纹波电压，较小的电感量通常带来较低的效率，但可以通过大的电流。我们目前设计的功率电感主要用在 3C 手持消费电子产品，在设计时要优化结构使产品满足高可靠性。

### 3.3 例子

BUCK 电路，输入电压 =110V，输出电压 60V，I<sub>o</sub>=1.5A，F=100kHz，工作模式 DCM，设计输出功率电感。

计算开关周期 T，T=1/F=1/100kHz=10us

计算占空比 D：D<sub>min</sub>=V<sub>o</sub>/V<sub>inmax</sub>=60V/110V=0.54us

计算导通时间 T<sub>on</sub>，T<sub>on</sub>=T\*D<sub>min</sub>=10us\*0.54us

计算电感纹波电流 dI，dI=取输出的 30%=I<sub>o</sub>\*0.3=1.5\*0.3=0.45A

计算电感两端电压 V，V=V<sub>inmax</sub>-V<sub>out</sub>-V<sub>diode</sub>=110V-60V-1V=49V

I<sub>peak</sub>=I<sub>omax</sub>+dI/2=1.5A+0.45/2=1.725A

计算电感量 L，V=L dI/dt，L=V dt/dI=49V\*5.4us/0.45A=588uH

取整 L=600μH 通过的电流为 1.5A。

当 I<sub>o</sub> < 1A 时，可采用非晶合金磁性材料制成的磁珠，套在整流管的输出端引线上，形成电感，而电流大于 1A 时，则应选用磁芯或磁环绕制。为减少电感直流电阻、降低损耗、减少电感发热，绕制滤波电感用的漆包线的电流密度 J 应按较小值。本例 J=4A/mm<sup>2</sup>，即漆包线裸线直径 d=20÷4=5.0mm<sup>2</sup>。

本例滤波电感导线细，选用 D=50mm 的磁环，每匝大约对应 3μH，但因磁环性能的差异，绕制时要由测试数据来确定电感量。

### 3.4 常见的磁性材料形状

#### 3.4.1 Mn Ferrite 锰锌铁氧体

功率材 ( $\mu_i < 3500$ ): 70%  $Fe_2O_3$ , 20% MnO, 10% ZnO 标示方式为 P4、P5、TP4、KL45、DMR40、HE4 等。功率 Mn-Zn 铁氧体初始导磁率一般在 1500 ~ 3000 Mn 1500 之间。主要关注特性为工作频率与功耗。对此类产品的要求是功耗要小; 饱和磁感应强度要高; 使用频率要高; 居里温度要高。主要运用开关电源与逆变器; 由于工作频率不断提高, 功耗值不断下降, 开关电源广泛用于电视接收机、电脑以及多电子设备中, 由于开关电源对电网电压波动的适应性优异, 开关电源获得了广泛应用, 从而功率铁氧体也赢广阔的市场。主要生产成 DR/ER/EP 等形状。像生产的 SMTER15/18 等平板变压器; SMTBW104/105/125/134 等; SMTDR0402/0804/1206 等; FC0420/0630/FC03188 等功率电感产品。

#### 3.4.2 Ni - Zn Ferrite 镍锌铁氧体

主要成分  $Fe_2O_3$  49—65mol% ; NiO 15—50 mol% ; ZnO 0—35 mol% (mol% 为分子数)。标示方式为: P3B、TN40H、TN65H 等, 一般数字表示初如导磁率的大小 (P3B  $\mu_i = 300$ ; TN40H  $\mu_i = 400$ ; TN65H  $\mu_i = 650$ )。高频材料的初始磁导率一般在 5—750 范围内, 材料镍的比重较大, 此类高频材料大多为多气孔材料。随着开关电源工作频率的不断提高, 镍锌铁氧体磁芯还可用来制作工作频率很高的开关电源变压器。可在 10kHz 至 300MHz 频率范围内使用。可用于制作中周变压器、磁头、短波天线棒、调谐电感电抗器以及磁饱和放大器等的磁芯。在我司的应用: 占铁芯用量的 60% 以上。像 EC、VC、PK、SMTDR、MTDRRI 类, 像工字形的 DR、RI 框等。

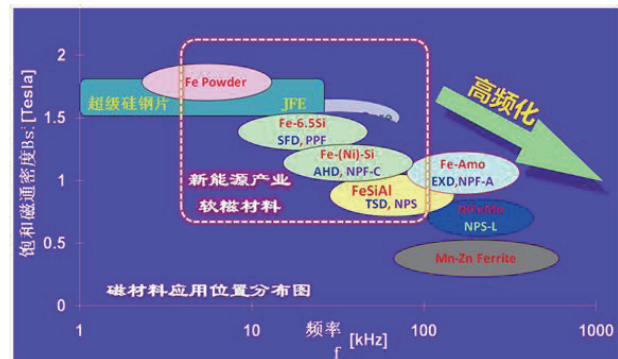
#### 3.4.3 Iron (铁粉芯)

环形、EI 形, 大功率电感方面应用也很广泛, 根据不同波段下对滤波要求不同会添加各种不同的其他物质, 于是就有多种材质衍生出来。初始导磁率在 100 以下。铁粉芯因为其饱和性能好, 适用频率高, 可达到 2MHz 的工作频率, 像目前我司生产的 DPI/UPI/ 铁粉芯的 SMTER 等, 和瑞生产的 T CORE 如材质 “2”、“8”、“18”、“26”、“52” 等。

## 4 各种磁芯分类

#### 1. 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



## 5 铜线

常用铜线的分类:

- 1."1UEW" 普通直焊 1 种漆包线 (漆包膜较厚)
- 2."2UEW" 普通直焊 2 种漆包线 (漆包膜较 1UEW 薄)
- 3."PEW" 高温漆包线, 一般用一种线即 1PEW
- 4."SBW" 自粘线
- 5."UCTC" 纱包线
- 6."TEX" 三层绝缘
- 7."TCW" 电镀锡铅纯铜线
- 8."TCC" 热镀锡铅纯铜线
- 9."TAW" 电镀锡铅铜合金线 (高温焊锡后仍较硬)
- 10."PVC" PVC 塑料包封线

A 漆包线 ---"1UEW"、"2UEW"、"PEW"、"SBW" 均是漆包线, 是在纯铜线上覆盖绝缘层而制成。普通线的耐热等级是 130℃, “F” 级线的耐热等级是 155℃, “H” 级线的耐热等级是 180℃。“1UEW”、“2UEW”、“SBW” 是直焊线 (即可直接在锡炉中焊锡, 这三种线在外观上没有甚么区别), 焊锡条件是 380~390℃ / 3 秒; “PEW” 是非直焊线 (即不可直接在锡炉中焊锡, 须先将线的漆包膜脱去后才可焊锡)。“NY” (尼龙) 线是在漆包膜的基础上再加涂尼龙层以便线较耐磨。“SBW” (自粘线) 有酒精溶解型 (在线的表面擦上酒精后, 线才会粘在一起) 和加热粘着型 (对线加

热后，线才会粘在一起)。

漆包线主要用来绕制线圈本体。各种具体漆包线的特性参数请参看供应商目录，如：

大亚 铜线	PVF	PEW	UEW	UEW	UEW +NY	UEW +NY	PEW +NY	SEIW	EIW	EAIW	AIW	R <sup>+</sup> -SB
直焊 性	否	否	300 ℃/ 3sec	390 ℃/ 3sec	300 ℃/ 3sec	390 ℃/ 3sec	否	455 ℃/ 3sec	否	否	否	-
密着 性	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
耐磨 性	优	优	良	良	良	良	优	优	优	极优	极优	良
皮膜 硬度	5- 6H	4- 5H	3- 4H	3- 4H	5- 6H	5- 6H	5- 6H	4- 5H	4- 5H	5- 6H	5- 6H	-
耐热 冲击 性	优	可	可	可	可	可	可	优	优	极优	极优	可
耐软 化性	270- 290℃	320- 360℃	200- 250℃	250- 270℃	200- 250℃	250- 270℃	320- 360℃	300- 330℃	370- 410℃	340- 390℃	400- 430℃	-
耐酸 性	极优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优
耐碱 性	极优	可	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优
耐苯 性	极优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优
甲醇 抽出	-	-	-	-	-	-	-	0.55%	0.33- 0.53%	0.55%	0.33- 0.53%	-
冷媒 发泡	起泡	-	-	-	-	-	-	不起泡	不起泡	不起泡	不起泡	-
冷媒 抽出	-	-	-	-	-	-	-	0.20%	0.20%	0.24%	0.20%	-
冷媒 耐压 衰减 (%)	2- 32%	-	-	-	-	-	-	0%	0%	0%	0%	-

## 6 功率电感发展方向

目前移动电话、相机、笔记本电脑的磁盘驱动器以及便携式音频播放器只是少数还在使用的传统电子元件，现在需要更多的是功率电感器。将日益复杂的电路整合到更加狭小的电路板空间中的巨大的市场压力导致了性能更佳的、极具竞争力的、更为精巧的终端元件的需求增大。电路板上的大功率转化终端元件的广泛应用也导致了高效率直流转换器和更精细电感器需求的增加。为了适应这一挑战，元件制造商都花重金在材料与制作上发展、生产和改善绕线 and 多层片式电感器，用具有相等或更好的性能的但也更加精细的设计来迎合市场的需要。精细功率电感器在便携式电子产品的电源供应器设计当中，面临的最大挑战是，既要提高电源供应器的工作效率还要减小它的尺寸，也就是说要在电力供应设计中最好使用最小的电感器。解决此难题的办法之一是，提高 DC/DC 转换器的开关频率，这是影响低电感和小尺寸元件的关键。由负荷波动引起的瞬态响应较低的电感值是抵消了更好的。在这种情况下，

伴随着负载波动所引起的更快的瞬态响应，低电感值因高频率而偏移。但是，有得必有失，提高开关频率的同时也增加了开关损耗，这同样会导致工作效率的降低。由于其他重要电路设计之间相互作用会影响器件性能这一特点，所以仅仅靠增加开关频率并非易事。近期，开关频率一直保持在 500kHz 左右而电感在 4.7 ~ 10 μH，这些因素包括提供更好的电路设计，改进材料，完善制造技术，都能让开关频率保持在 1MHz 以下。然而，内部电路的进一步细化使得开关频率已经高达 3MHz，但同时电感值也低于了 2.0 H。据推算，6 ~ 8MHz 的开关频率以及低于 1H 的电感值并不常见，这就导致了电感器小型化的戏剧性。

手机用电感器技术的进步已经在包装厚度上显现了出来，例如，从两三年前 2mm 到现在的 1mm。该技术的显著改善让靠超薄元件支持器件的微型化趋势持续吸引着全球电子产品消费市场。即便如此，单纯靠使用较小的电感器也不是一个完善的解决方案。绕线改善规模较小的便携式设备需要更紧凑的更高效率的 DC/DC 转换器，靠这些补充设备的强大功能来最大限度的完善电池能量。尽管大的元件难以同时缩减电感尺寸和保持较低阻抗，厂商们依然在通过更好的设计，改进材料科学，提高制造技术来减少电感器尺寸。尽管电感器是相当简单的结构，但为了适应市场微型化的不断需求同时不降低性能，我们仍有许多技术障碍需要克服。

随着信息产业的进步，电子产品在小型化、便携式元件高密度装配及降低生产成本之发展趋势下，表面粘着技术已快速发展，促使三大被动电子零件，电阻电容、电感芯片化比率年年提高。

其中芯片电感由于构造较复杂、制程困难度较高，芯片化比率远较电阻及电容为低。

但因其主要用在 3C 产业(信息、通讯及消费性电子产业)上，由于整个 3C 产业朝小型化、多功能化及高频化发展、使市场上对电感的特性需求有加速朝小型化、高频化、及多功能化发展之趋势，将对国内芯片电感厂商产生不小之冲击。

## 7 技术发展状况

由于移动通信、笔记型计算机及网络系统之发达，使得系统之体积越来越小，但功能却可提升为原来之数倍；

进而使得元件必须朝轻薄短小发展,甚至单一的元件已无法满足系统对其之要求,因而促成复合式元件需求之增加,如 L/C 滤波器、排感 (bead array)、射频模块 (RF module) 等等。

电感之发展主要可分为以下几个方向：

### 7.1 高频化

(1) 积层芯片电感已广泛使用于无线通信设备上,具有尺寸小、成本低之优点。但在高频范围内之质量因子较低,在某些线路中(如压控震荡器模块, VCO) 始终无法取代成本较高之绕线式电感。由于质量因子 (Q) 可以下式表示之  $Q=2\pi fL(1-2\pi fLC_p)/2R_s$  L: 有效电感值 F: 频率  $C_p$ : 寄生电容  $R_s$ : 含肌肤效应之电阻值由上式可知,要提高质量因子可由降低寄生电容及肌肤效应着手。

### 7.2 迷你化

近年,在无线移动电话持续小型轻量化之驱使下,电感亦不断往迷你化发展。1999年,0402产品在无线移动电话应用上,已成为主流产品。不少日系厂商甚至已推出0201之芯片电感。

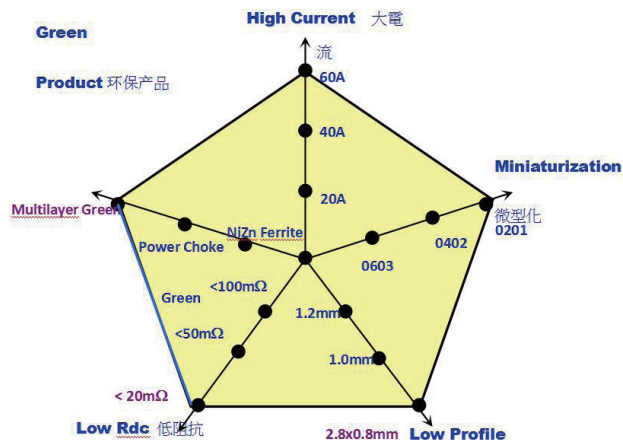
### 7.3 复合化

要使元件体积缩小而功能又要提升,则必须使元件复合化。复合化技术包括使数个电感复合之排感:其利用结合数个电感以减少元件间间距 (pitch),达到减少组装空间之需求,同时降低表面黏着时拾取与放置 (pick and place) 之时间,进而降低组装成本。

### 7.4 模块化

单靠元件之复合化,仍无法完全满足移动通讯产品组装空间之要求,需靠模组化之技术才可进行一步节省30-40%之空间。此项技术主要利用多层陶瓷之技术将电阻、电容、电感及传输线以三度空间之方式整合在一起,甚至与混成电路 (hybrid circuit) 技术配合将集成电路 (IC) 及较难以积层化之元件 (如高阻值之厚膜阻) 结合在一起,制作积层混成电路模块 (图十一)。许多日系厂商已先后推出此类产品,如压控震荡器 (VCO) 模块、射频接收前端 (RF receiver front-end) 模块、功率放大器 (power amplifier) 等。此项技术为未来元件市场之主流。

## 8 产品发展趋势



## 9 常用典型电感

### 9.1 大电流电感

指高稳定性,耐大电流的电感。它具有普通的贴片电感的特点,但性能上与普通的电感有很大区别,在低压大电流 DC-DC 转换器中,广泛使用一种全新的,低高度,高功率密度的输出电感,该电感采用高频低损耗铁氧体磁芯,和耐高电流,极低损耗的平面绕组组合而成。

大电流电感具备所有 SMD 功率电感的特点,另外它还有以下特点:

1. 磁屏蔽结构,磁路闭合,抗电磁干扰强 (EMI),超低蜂鸣叫,可高密度安装。
2. 磁损低,DC 电阻小,在同规格产品中电流最大。
3. 组合式结构,结构坚固。
4. 小体积、大电流,在高频和高温环境下仍保持良好的温升电流及饱和电流。
5. 采用快速脱漆工艺, PIN 脚表面光滑、不变形、易上锡。
6. 应用于工控主板、笔记本电脑、车载设备、分配电源系统、DC/DC 转换器、LED 驱动电源、通讯设备、医疗设备、军工电子、航天科技等。

扁平线圈电感即一种扁平式线圈的电感器,由一线圈部,所述线圈部两端延伸的接脚部,一由铁粉压铸而成的导磁座及盖体所构成;其中,线圈部为一扁平圈绕式导线材,其两端接脚部朝与外部电路导接方向折弯,并在所述线圈部及接脚部的外表注有一绝缘包覆体,只外露一部分接脚部作为与外部电路连接的接面,如此所述接脚部被



预先定型而连同线圈部一起套置于导磁座中。

为了使功率电感的使用寿命得到保证；我们在选择构成材料时，就必须谨慎小心，选择导磁率较高的含锰、镍芯材质的磁芯磁环。

使功率电感的磁饱和性更佳的同时漏磁较低，电阻极小，额定功率高，使功率损失降至最低趋于零。在选择铜线时必须选择耐温等级相对使用电路温度高的铜线，减少瞬间电流的变化带给电路的冲击。

使整机线路得到保证，当各个要件均得到保证，那么我们的功率电感使用寿命也可以得到相应的保障。在贴装技术中主要分为主动元器件和被动元器件，而功率电感即属于被动元器件中的一种，可以分为插装与贴片装的两种方式，所谓的功率电感；就是能够产生功率的作用同时适用于表面贴装的一种元件。

影响 DC/DC 直流电源模块性能的关键参数，尤其是输出电感特性对电源总体性能的影响。比如，通常为设计师所忽略的“寄生电感”会导致电源额外的效率降低，以及由于开关管，同步整流管的输出电容和电路寄生电感形成谐振电路而产生的传导和辐射等电磁干扰。

LC 电路谐振频率由下式确定：

$$F=1/\{2\pi \times (L_{stray} \times C_{oss})^{0.5}\} \quad (1)$$

通过电感结构调整技术最小化寄生电感的几种方法。同时，介绍一种全新的实现低高度，大电流的螺旋线电感绕制技术，输出电感的额定电流高达 15 安培——200 安培。

在给微处理器和其他逻辑电路提供低压，大电流的电源技术中，倾向于采用电源并联阵列技术，比如多相脉宽技术，同步整流技术等工作频率较高（500kHz——750 kHz）的技术。

采用这些并联技术的好处是可以降低低压大电流（如 1 伏特，100 安培）电源的总的交流或直流电阻。利用低损耗，高效率开关，采用以上所述的并联技术，电源模块即可达到良好的动态响应增益。但是，根据具体的应用场合，存在一个最佳的并联数，单路的承载功率越大，所需要的支路就越少。由于模块的可靠性随着器件的数量的增加而降低。决定实际需要几路取决于具体的应用需求。另外，在许多应用场合，为了满足工业标准低高度的要求，需要对应的器件实现低高度，平面化。通常，最难实现低高度的器件是输出电感。为了优化设计，必须有很宽选择范围的电感值和开关管，以供设计者进行选择。本文将分析输出

电感参数对转换器性能的影响。

影响电源性能的因素如下：

1. 电感的直流电阻对电源转换器的性能影响。
2. 电感的交流电阻对电源转换器的性能影响。
3. 杂散电感（漏感）对电源效率和其他性能的影响。

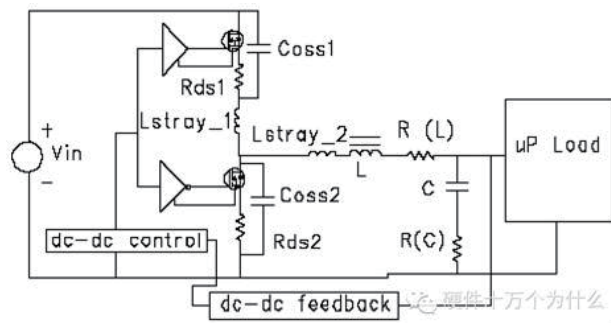


图 1

输出电感的新的要求：下一代的微处理器要求对应 DC/DC 直流转换器具有如下特点：1）为了满足瞬态响应要求，需要更低的输出阻抗（电源总的阻抗必须充分满足负载迅速切换导致的负载电流的快速变化可能产生的电压波动，电压必须保持稳定而不下陷或过冲，以满足实际要求）。2）更低的电感回路阻抗，以保证电源对动态可编程输出电压的响应满足处理器的要求（注意：为了满足当可编程电压调到更低电压时的响应要求，电源的输出端必须有足够容量的输出电容给处理器提供足够的充电电荷）。必须进行规划的关键参数包括总的开关接点阻抗（如图 1）。包括：电感阻抗，上面和下面的同步整流管的阻抗以及恢复体二极管的正向导通阻抗。在许多应用中，优化设计时必须考虑连续模式所需的最小电感量（低噪声）和瞬态响应要求的最大允许电感量。幸运的是，由于随着开关频率的提高，对应的电感量相应下降。不过设计师仍然需要很宽范围的电感值和额定电流值进行不同场合的优化设计。芯片制造商也应该意识到越来越高的电流和越来越低的工作电压这一发展趋势。高性能芯片需要的电流和电压为 250A 和 0.5V，是目前 50A 模块的 5 倍。

## 9.2 电感的直流电阻（DCR）

对电源模块性能的影响功率损耗的一个重要来源是输出电感的直流电阻（DCR），这一参数反映了电感的最小损耗条件。通过对电感直流电阻的确定，即可初步估计对模块效率的影响大小。

比如：假设 DCR=1mΩ，电流 I = 100A，那么电感直流损耗

$$P = I^2 \times DCR = 10W \quad (2)$$

如果电源提供 100A 电流，0.75V 电压，那么电感的效率是损失为：

$$\eta_{loss} = \{1 - (V_{out} \times I_{out}) / [(V_{out} \times I_{out}) + P_{dc,inductor}]\} \times 100\% = 11.76\% \quad (3)$$

由此可以看出，仅仅 1mΩ 电感直流电阻就会导致模块效率低于 89%。因此，对于输出电感来说，怎样对绕组结构进行优化，使直流电阻最小化就显得尤为重要。图 3 为一种将线圈截面尽量最大化的结构技术。螺旋线圈提供了最好的层间连接方法，由于线圈形状为扁平矩形截面，使得相邻匝间配合紧密，同时，高绝缘强度的绝缘层非常的薄，使得电感的窗口填充系数高达 80% 以上，而传统的漆包线的填充系数仅仅为 50% 左右。同时，由于是圆形绕制，同以前矩形绕制相比，相同匝数的线圈的长度最短，DCR 最小。另外，由于线圈是通过自动化设备配合相应的模具进行大批量生产，一致性非常高。

效率下降与电感 DCR 的关系：

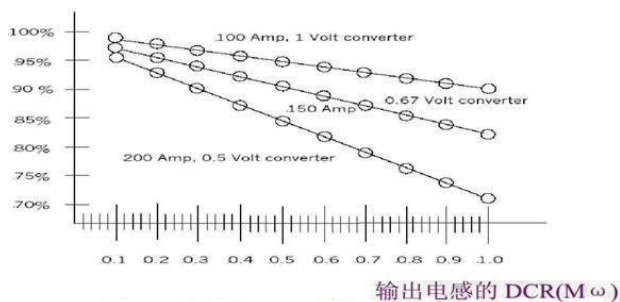


图 2 电感的 DCR 对电源效率的影响

### 9.3 电感交流损耗和对电源系能的影响

电感的交流阻抗 (ACR) 是电压，电流和工作频率的函数。电压，电流和开关频率越高，线圈的交流损耗就越明显。在 BUCK 非隔离降压电路中，输入总线电压越高 (相应电源输出电压越高)，线圈的交流损耗和磁芯损耗也越高。磁芯损耗随着输出电感的每匝电压的增加，磁芯的涡流损耗也越大，关系如下：

Eddy current in the Core  $d\Phi/dt$  和  $(\text{volts/ton})^2$  成正比

由方程 4 可以看出，磁芯损耗与每匝电压的平方成正比。因此，对于 48V 输入总线的磁芯损耗是 24V 输入总线磁芯损耗的 4 倍。

通常，当开关频率超过 250kHz 是，开气隙的铁氧体磁芯性能优于铁粉芯磁芯以及其他的低电阻率 (如合金带) 的磁芯。这是由于铁氧体材料具有很高的电阻率，大约为 1.5kΩ/cm，而合金带的电阻率仅为十分之一毫欧 - 厘米。这就是为什么在高电流和高频场合常常选用低高度的 PQ 或 RM 性平面磁芯的关键原因之一。绕组交流损耗虽然磁芯损耗与开关频率的依赖不是很大，但是，绕组交流损耗却和开关频率紧密相关。两个因素决定了绕组的交流损耗：趋肤效应和临近效应。由公式 3 到 5 可以看出，电感绕组越薄，越扁平，对应频率下的交流损耗越小。开关频率越高，交流电阻越大，而不像直流电阻是一稳定值。图 3 所示的螺旋线圈在给定直流和交流纹波要求下，可以通过形状调整，达到直流电阻和交流电阻的最佳平衡。纹波电流和开关频率越高，扁平线圈厚度越薄，以避免交流过多超过直流损耗。以下的公式在评估一定开关频率下确定线圈的厚度非常有用：

趋肤深度

$$D(\text{pen}) = 7.6 / \sqrt{f} \text{ cm} \quad (5)$$

交流电阻

$$R_{ac} = R_{dc} \times D(\text{coil}) / D(\text{pen}) \times n (\text{层数}) \quad (6)$$

这里，D(pen) 表示对应开关频率下的趋肤深度，而 D(coil) 表示线圈厚度。通过方程式 4 可以导出单层平面电感的趋肤深度。针对不同的应用场合，交流功耗是纹波对直流输出电感百分比的函数。举例来说：假设有 100A 输出电感，1V 输出电压，750kHz 开关频率的降压模块，纹波为直流电流的 6%，那么交流电阻导致的功耗为：

$$P (\text{电感交流电阻损耗}) = I_{\text{纹波}}^2 \times R_{dc} \quad (7)$$

对于 1.27mm 厚，直流电阻为 0.45 毫欧，3 匝线圈的功耗为 2W。

而对于 2.54mm 厚，直流电阻为 0.15 毫欧，3 匝线圈的功耗为 1.3W。

当然，方程 6 仅仅适用于扁平螺旋线电感，这是由于此时绝大多数导体表面的磁场截面积都是一致的。典型的输出滤波电感有更小的交流纹波电流分量，同平面变压器相比，在优化设计时，平面电感有更高的交流直流电阻比 (Rdc/Rac)，因此，在设计高输出电流，低输出电压的输出电感时，低直流电阻 DCR 是优先考虑因素。

### 9.4 漏磁通 (漏感) 对模块效率和其他性能的影响

在开关电源电路中，通过减小开关管和输出电感之间的连接线之间的漏感是减小 L-C 寄生振荡的有效途径。如图 4 所示，在输出电感端部引线和结构有助于较小 EMI 噪声和增加模块效率。虽然该电路模型拓扑为同步整流，但是对于以肖特基二极管代替同步整流管的典型的降压模块同样适用。从传统的时域分析可以看出，振荡发生在开关管关断时电感漏感和开关管的  $C_{oss}$  非线性电容发生谐振过程中。如果假定开关管的模型是理想化的，但是由于开关管的寄生非线性电容始终存在，方程 10 和 11 表示出了功耗和开关管的寄生电容  $C_{oss}$  和漏感的关系。方程式 9 和 10 表示出了开关管关断过程中电磁干扰噪声的产生原因和电路参数的相互关系。

$$C_{oss} \propto \frac{1}{\sqrt{V_{ds}}} \quad (8)$$

$$t_{oscillation} = \frac{2 \cdot C_{oss} \cdot \sqrt{V_{ds}}}{I_s} \quad (9)$$

$$E_{loss} := \frac{1}{2} \cdot L_{stray} \cdot I_s^2 \quad (10)$$

$$P_{loss} := E_{loss} \cdot f \quad (11)$$

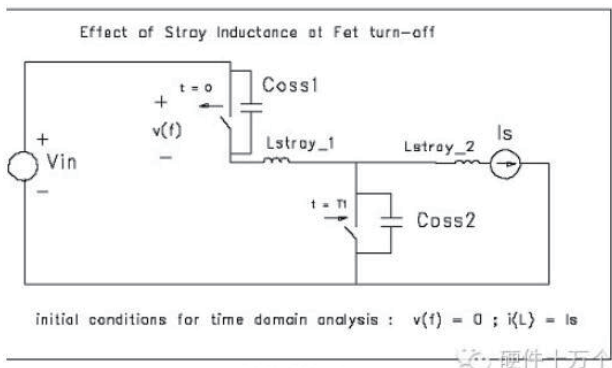


图 4

假定在图 4 所示的典型的降压型电源模块中，开关管寄生电容  $C_{oss} = 1000\text{pF}$ ， $V_{ds} = 48\text{V}$ ， $f = 750\text{kHz}$ ， $I_s = 100\text{A}$ ， $L_s = 1.0\text{nH}$ 。那么，通过公式 9 可以得到振荡周期为 0.138 纳秒或者最高频率为 7.2GHz。从公式 9 还可以看出，开关管的寄生电容越大，振荡周期越长。

从公式 10 和 11 可以计算出功耗  $P_{loss} = 3.75\text{Watt}$ 。这表明硬开关电路产生严重的电磁干扰噪声。如果增加两个 MOS 管之间的距离以及同输出电感之间的距离，功耗会随着漏感的增加而急剧增加。因此，在布局时，必须合理考虑器件的相对位置。

## 9.5 控制漏感

漏感不仅会导致模块的功耗增加，正如他的名称，由于漏感并未全部经过磁芯的磁路，部分磁路经过附近的空气，因此，在空间产生很强的电磁场，导致对附近的电路产生串扰 (crosstalk)。输出电感必须采用闭合磁路的磁芯，比如 RM 型，PQ 型等。这些磁芯对绕组进行了屏蔽，从而降低了漏感的辐射。在高功率情况下，由于磁环绕制的线圈暴露在外，必须避免使用。工字型的磁芯，磁场完全通过空间发散，漏感情况最严重。在许多输出电感的设计方式中，由于引线端头分布不合理，在磁芯的两端存在隐含的“半匝”效应，迫使线圈的最后一匝的磁路通过空气来闭合。也会导致漏感和发散磁场的增加。图 5 和图 6 给出了采用 PQ 磁芯设计的闭合磁路的具有低发散漏感的低高度，高电流螺旋线输出电感。该种结构除了有利于器件小型化，从而有利于布局设计外，还具有很宽范围电感值和电流值，充分满足了设计师对低噪声，大电流输出电感的选择要求。

因此在不久的将来，满足对新型处理器供电要求的直流-直流模块需要 25A, 50A, 100A 的输出电感的需求越来越大。这要求输出电感的 DCR, ACR 以及漏感都非常小。因此，采用扁平线圈螺旋线技术是达到以上要求的最佳方案。设计和生产扁平螺旋线圈必须投入非常大的资金和精力，积累丰富的设计和生产经验，能够提高各种规格的螺旋线圈，竭诚客户提供尽善尽美的产品和服务！

## 10 结语

功率电感以其优良的性能和有竞争力的性能价格比，可以肯定它会在较大领域内取代传统电子变压器及低频电感，随着功率电感技术性能进一步提高，它将会在电源等领域中有更广阔的应用前景。