

设计门脉冲驱动变压器指南

A Guide to Designing Gate-Drive Transformers

高适 编译, 姜劲 校

摘要: 文章论述采用逐步逼近的设计程序, 以优化适用于开关电源的变压器的机械、热和电气性能。

关键词: 门脉冲驱动, 变压器, 设计指南, 开关电源

中图分类号: TM4 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517 (2010) 08-4-114

1 引言

因为电子设备的电路变得十分复杂, 故要求熟练的电子工程设计参数变得更为临界。在电路设计的每一个阶段, 进行精确的工程计算是必需的, 同时, 这在另部件的设计阶段也是十分重要的。对于开关电源中的元件之一——门脉冲驱动变压器必须仔细地设计。

开关电源中的门脉冲驱动变压器是被要求用作控制设备的定时装置的。这种器件为导通和断开诸如高压功率 MOSFET 或 IGBTs 等半导体器件提供电压脉冲。它们也被使用于电压隔离和阻抗匹配。门脉冲驱动变压器在本质上是脉冲变压器, 是被用来驱动电子开关器件的门开关的, 它为开关的脉冲电压获得上升时间、降落和过冲的最佳参数。人们从别的变压器来识别门脉冲驱动变压器的应用。

基本的门脉冲驱动变压器存在若干个设计变量, 每一个设计变量由该变压器特殊的应用要求来确定。它们的一些通用简图及其相对应的匝数比示于图 1。

为降低成本, 典型的门脉冲驱动变压器是采用铁氧体磁心设计的。通常使用的磁心组件是 EE, EER, ETD 和 EFD 等一些类型, 这些类型都属于“E”形磁心并且使用

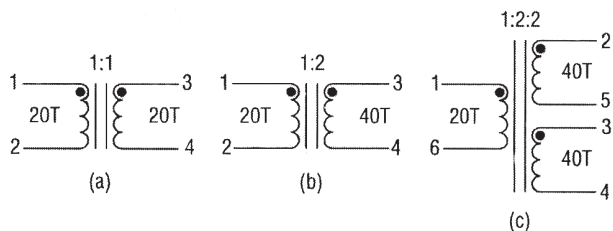


图 1 这些图解反映出门脉冲驱动变压器存在若干种组态的可能性

相对应的绕组骨架。这种骨架可使用表面安装技术或穿过小孔引线。在某些情况下, 这类变压器的设计也可以采用环形磁心。

典型的脉冲变压器设计所需要的参数列于表 1。

表 1 典型的脉冲变压器设计参数

磁路设计具体参数
电压
匝数比
ET(V μ s)
工作频率
占空比
功率电平
绝缘强度
工作温度
安全性要求 (例如 UL、VDE、CUL、IEC 或 TUV)
封装 (表面安装或引线穿孔)
军用的或工业使用的

如果存在安全性标准 (例如 UL、VDE、CUL、IEC 或 TUV 等) 的要求, 则变压器的设计必然要涉及一定的漏电及其消除方法问题。为了在设计中落实漏电流及其消除的要求, 以上安全性标准的文件资料可以从安全管理代办处购买。

如果变压器是为了军事产品所采用的, 则要求在选用的制作材料中不允许存在 ROHS 指令所限制的危险物质 (非环保物质)。磁路设计工程师应了解这个指令, 因为 ROHS 指令限制的危险物质会潜在地影响产品的性能, 所以, 这些材料也应限制在变压器中采用。

2 磁心材料的选择

设计变压器的第一步是确定磁心用的材料。磁心材料的选用建立在工作频率的基础上。表 2 列出了几家磁心销

售公司及其推荐用于三种不同频率范围的铁氧体材料。开关电源 (SMPS) 的工作频率取决于门脉冲驱动变压器初级绕组要求的电感值的总量。其一般的指导原则列于表 3。

表 2 变压器磁心用铁氧体材料^[1]

材料 牌号 销售公司	频率 范围	100kHz到 200kHz	200kHz到 500kHz	500kHz到 1MHz
Ferroxcube		3C90	3F3	3F35
EPCOS		N67, N87	N49	N49
ACME		P4	P5	P51
Mag Inc		P	R	K
Nicera		NC-2H	2M	5M
TDK		PC40	PC50	PC50

表 3 变压器初级电感值与工作频率关系的一般指导原则^[2]

工作频率(kHz)	初级电感值(mH)
50到100	2到4
100到300	0.5到2
300到500	0.05到0.5

3 把寄生参数减到最小

在设计门脉冲驱动变压器时, 要控制的两个关键性电参数是漏电感值和绕组电容量。大的漏电感值和绕组电容量可能产生不合乎要求的输出信号: 诸如相位移、计时错误、噪声和过冲。在绕组间为弱耦合时, 漏电感即会发生。在绕组具有很多匝数以及在绕组制作过程中, 线匝没有被均匀地排列时, 则会导致大的绕组电容量。

在变压器的电性能设计阶段以及在确定变压器制造的技术条件中, 漏电感值应尽量保持最小值。在实际设计中, 有许多公式有望用来近似计算漏电感值。

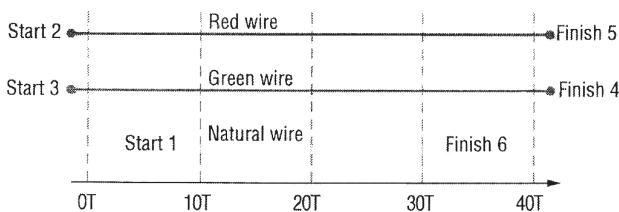


图 2 这种绕组技术规范所示的线匝排列将增大不同绕组间的感应耦合

用于估算漏电感值的磁路设计计算公式之一如下式所示:

$$I_L = \frac{10.6(N^2)(MT)(2nc + a)}{10^9 n^2 b}$$

式中, I_L 等于两个绕组的漏电感值 (单位, 亨), N 是绕组的匝数, MT 是整个磁心的平均匝长 (吋), n 为两个绕组之间的绝缘 (隔离) 量级, c 等于绝缘 (隔离) 层的厚

度 (吋), a 是绕组的高度 (吋), b 是绕组的横向长度 (吋)。

有一件事情是在所有的磁心制造中需要避免的, 那就是要避免绕制半匝磁心。因为半匝是不能耦合的, 这样才能避免有大的漏感值。绕组电容量应保持在微微法 (10^{-12} 法) 范围以内 (希望小于 100PF)。

在制造门脉冲驱动变压器时, 漏电感值可以在制造过程中借助适当的绕制方法予以限制。图 2 所示的绕制技术说明显示的是从中心开始绕制的方法。绕组技术说明的次序排列反映在图 1c 中。注意, 其终端定位 1 和结束位 6 两者都在初级侧。

这种从中心开始绕制线圈的方法可以增加绕组匝间的感应耦合强度。如何绕制该线圈的渐进过程简述如下:

- 手中持两根导线: 红色导线和绿色导线 (起始点定位 2 和定位 3), 双股缠绕 10 匝。
- 现在, 添加上原有的导线併成三股, 用手中的三股导线 (这一步记录的起始点定位 1) 加绕 20 匝。在缠绕总数为 30 匝之后, 停止缠绕原有导线。这一步由终点结束位 6 反映。
- 用红色和绿色导线併成双股再绕 10 匝, 此时的绕组总匝数为 40 匝。这一步完成了终点结束位 4 和结束位 5。

现在, 基本信息已由设计和制造门脉冲变压器绕组的过程提供, 设计可以采用图 1c 作为参照的设计实例完成。电感值的范围据表 3 所示将保持在 $50 \mu H$ 到 $500 \mu H$ 两者之间。该变压器的电气性能要求由表 4 所示。

表 4 脉冲变压器设计样机电性能要求

脉冲变压器设计样机参数	
电压	12V _{peak}
匝比	1:2:2
ET	10.5(V-μs)
工作频率	300kHz
占空比	50%
功率电平	<5W
绝缘强度	500V _{dc} (绕组之间)
工作温度	-20°~130℃
安全性要求	N/A
封装 (表面安装或通孔安装)	表面安装
军用或工业应用	工业应用

如上所述, 设计门脉冲驱动变压器的第一步是决定采用多大尺寸的磁心和使用什么磁心材料。在现实的设计应用中, 为许多产品可以共用的磁心材料是由表 2 列出的 Ferroxcube 公司提供的 3F3 或其等效材料。

因为列入清单的功率电平小于 5W, 可被选用的磁心为 E5.3/2.7/2-3F3 磁心。AL 值 (定额在每千匝几毫亨 (mH))

为 265+25% (199 到 331)。该磁心的截面积是 0.0265cm^2 。

采用如下公式进行匝数计算：

$$N = \frac{ET}{(B)(A_{\text{core}}) \times 10^{-8}}$$

式中, B 为磁通密度 (单位, 高斯), A_{core} 等于磁心截面积 (cm^2), ET 等于“伏-毫秒”常数 ($\text{V}-\mu\text{s}$)。

ET 度量变压器或电感器的功率处理能力, 其取决于磁心截面积、磁心材料、绕组匝数和所使用脉冲的占空比。

这种变压器设计中使用的磁通密度电平为 2000 高斯, 这就不存在使磁心饱和的危险, 因为由 Ferroxcube 公司提供的 3F3 材料的磁通密度达到 4000 高斯。同时, 因为采用的是 E 型磁心, 在其粗糙的表面上所存在的气隙很小, 这可以帮助防止磁心进入饱和状态。

4 计算确定绕组匝数

根据已知的所有参数, 利用以上计算绕组匝数的方程式, 初级绕组的匝数即可计算出来:

$$N = \frac{ET}{(B)(A_{\text{core}}) \times 10^{-8}} = \frac{10.5 \times 10^{-6}}{(2000)(0.0265) \times 10^{-8}} = 20 \text{ (匝)}$$

式中, B 取 2000 高斯, A_{core} (磁心截面积) 取 0.0265cm^2 , ET 取 $10.5(\text{V}-\mu\text{s})$, 计算得到的初级绕组为 20 匝, 次级绕组则是 40 匝, 以满足 1:2:2 的匝数比。

5 计算确定导线规格

我们采用初级最小电感值为 $50\mu\text{H}$ 来计算电流, 如表 3 所示。输入电流使用以下公式计算:

$$I = \frac{V_{\text{peak}}}{2 \times \pi \times f \times L} = \frac{24\text{V}}{2 \times \pi \times 300\text{kHz} \times 50\mu\text{H}} = 255 \text{ (mA)}$$

初级绕组导线尺寸的计算方程式为:

$$A_{\text{wire}} = (\text{圆密} / \text{安培}) (I_{\text{IN}})(DT)$$

式中, A_{wire} 为导线的截面积 (单位, 圆密), I_{IN} 等于输入电流 (A), DT 为占空比。

式中的“圆密/安培”以 500, I_{IN} 以 255mA 和 $DT=50\%$ 代入计算, 得到的导线截面积为 63.75 圆密。选用留有余量的 #32 规格的导线尺寸。初级绕组可以采用 #32H 规格的导线 [MW80C(155℃)]; 所以要选用 MW80C, 这是因为它能够满足 130℃ 以上的温度限制, 也因为它可被去除了焊锡, 在制造过程中容易使焊锡除掉。

次级绕组导线尺寸规格的选择则建立在其每个绕组的

电流为 3mA 电平的基础上。每个绕组的导线电流是 1.5mA, 用“圆密”为单位计算导线截面积。因此, #48H 规格的导线可以被用于每个次级绕组。

6 完成设计

因为导线的规格尺寸已经计算出来, 下一步的任务是确保所有的材料能适合于封装。必须选择适合的胶合剂将铁氧体磁心胶粘在一起。

初级绕组开路时的电感值用以下公式进行检验:

$$L = (N^2)(AL \times 10^{-9}) = (20^2)(265 \times 10^{-9}) = 106\mu\text{H}$$

因为磁心 AL 值的公差是 $\pm 25\%$, 所以最小的电感值是 $79\mu\text{H}$ 。相对来说, 该电感值是小的, 但它已能够满足设计要求。最小的电感值必须达到 $50\mu\text{H}$ 。增加绕组匝数将会增加电感值, 但同时会牺牲绕组的电容量。所以, 必须确保 20 匝的规定。

最后, 提供给用户的产品必须具有完整的封装 (见图 3 所示)。为完成产品设计的最终材料清单见表 5 所列。

表 5 用于成品脉冲变压器的最终材料清单

脉冲变压器设计样机的材料清单	
磁心	Ferroxcube E5.3/2.7/2-3F3
骨架	Ferroxcube E5.3/2-1S-bp
导线	#32H (MW80C 自然色)
导线	#48H (MW80C 绿色和红色)
焊料	高温 (SN10或SN96AG4为ROHS所要求)
胶合剂	由制造厂商选用 (胶合磁心)
带料	3M#56 (用于外部缠绕)

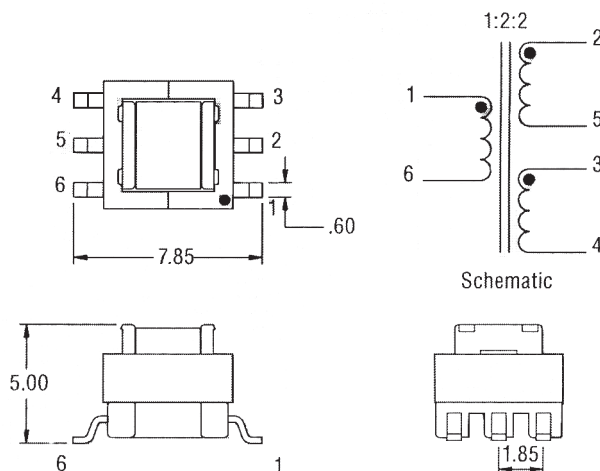


图 3 不同技术规格的脉冲变压器成品反映的多种参数
必须在设计过程中进行优化

参考资料

- [1] Wagner, J. "Solid State Tesla Coils-General Notes,"
<http://users.tkk.fi/~jwagner/tesla/SSTC/general-sstc-notes-gatedrv.htm>, pp. 2-3.
- [2] Andreyca, Bill, Unitrode Switching Regulated Power Supply
Design Seminar Manual, "1MHz 150W Resonant Converter Design
Review," Unitrode Corp., 1988.
- [3] Lee, Rueben, Electronic Transformers and Circuits, 2nd Edition,
John Wiley & Sons Inc., 1947, p. 76.
- [4] Ferroxcube Foft Ferrites and Accessories Data Book, 2004.

(编译自 www.powerelectronics.com January 2007)