

7.5 变压器设计实务

为了介绍 Magnetics Designer 的功能，以下使用 Magnetics Designer 设计 50W 顺向式转换器的高频变压器，此变压器的电气特性可以转换成 IsSpice 的模型并进行电路仿真。

7.5.1 电路特性描述

顺向式转换器电路如图 7.5.1 所示。当功率晶体 Q1 turn on 时，由于一次侧绕组 N_p 的极性黑点与输入电源电压的正端连接，电流 I_{pri} 流经变压器的一次侧绕组，并将能量储存于其中，电感器上有压降存在，电流 I_{pri} 线性上升。由于变压器的一次侧绕组 N_p 与二次侧绕组 N_s 有相同的极性，二极管 D1 顺向偏压而导通，飞轮二极管 D2 逆向偏压而截止。当功率晶体 Q1 turn off 时，跨于变压器一次侧的绕组电压反向而极性改变，此时二极管 D1 逆向偏压而截止，储存于电感与输出电容的能量经由顺向偏压的飞轮二极管 D2 转移至负载。而储存在变压器铁心中的能量必须释放掉，所以，电路中必须有去磁 (demagnetization) 绕组 N_r ，就是利用变压器的第三绕组与二极管 D_r 互相串联一起，而达到变压器去磁作用。顺向式转换器的主要波形如图 7.5.2 所示。

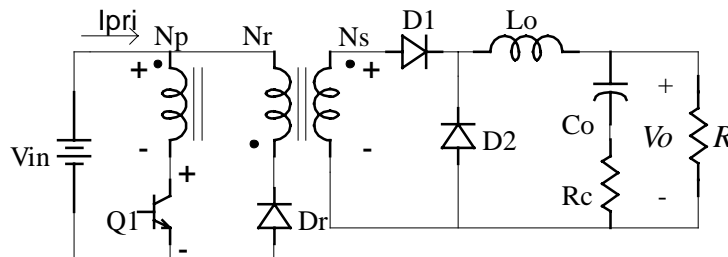


图 7.5.1 顺向式转换器电路

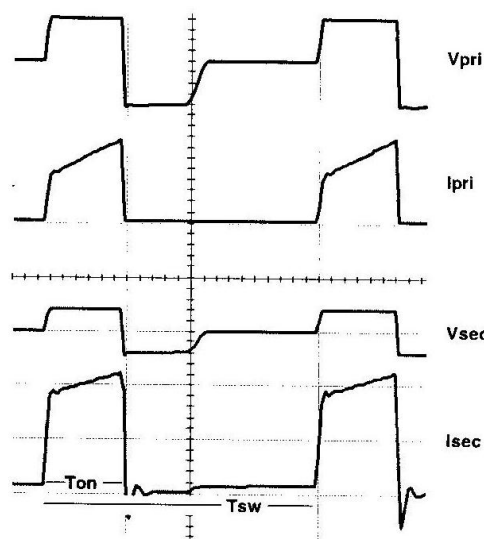


图 7.5.2 顺向式转换器电路的主要波形

高频变压器的设计规格如下：

铁心形式	=Pot core, Ferrite, Magnetics
材料种类	=F (高频, 100 度)
最大绕线窗利用因子(Kw)	=90%
最大温升	=50 度
最大室温	=25 度
磁通形式	=半波 (Half Wave)
波形形式	=方波 (Square wave)
输出功率	=57W
操作频率 (Frequency)	=100KHz
一次侧电压 (Vpri)	=40Vavg
一次侧直流电流 (Idc-pri)	=1.43A _{dc}
一次侧交流电流 (Iac-pri)	=1.44A _{ac} (rms)
二次侧电压 Vsec (5V)	=11.4Vavg.
二次侧直流电流 Idc (5V)	=5A _{dc}
二次侧交流电流 Iac (5V)	=5.05A _{ac} (rms)
返驰电压 Vflyback	=40Vavg
去磁绕组电流 Iac (40V)	=200mA (rms)

下列的方程式描述转换器的电气特性：

输出电压：

$$V_o = D \cdot k_t \cdot \eta \cdot V_{in} \quad (7.5.1)$$

其中 V_o ：输出电压， D ：开关的工作周期， η ：转换器的效率， V_{in} ：输入电压， k_t ：变压器的匝数比

峰对峰值电感电流：

$$\Delta I_L = \frac{(1-D) \cdot T_{sw}}{L} (V_o + V_{fwd}) \quad (7.5.2)$$

其中 ΔI_L ：峰对峰值电感电流， V_{fwd} ：整流器的顺向电压， T_{sw} ：切换时间
 L ：电感值

平均电感电流：

$$I_{l(ave)} = I_o = \frac{V_o}{R_o} \quad (7.5.3)$$

其中 I_o : 输出电流, R_o : 负载电阻

顺向式转换器的最大工作周期为 50%, 功率晶体 Q1 的最大工作周期发生在输入电压最低与输出电流最大时, 最大的稳态输出在 10A_{dc} 为 +5V_{dc}, 最小输入电压为 40V。考虑整流器的顺向压降, 变压器二次侧电压输出必须大于 5.7V, 使用先前的方程式, 切换频率为 100KHz 与 8uH 的输出电感, 峰对峰值电感电流 $\Delta I_L = 3.56A$, 因此 $I_p = 10 + 3.56/2 = 11.78A$, $I_m = 10 - 3.56/2 = 8.22A$, 跨于变压器二次侧的平均电压为 $5.7/0.5 = 11.4V$ 。

$$I_{dc(sec)} = \frac{D \cdot (I_p + I_m)}{2} = \frac{0.5(11.78 + 8.22)}{2} = 5A \quad (7.5.4)$$

$$I_{rms(sec)} = \sqrt{D \left(I_p \times I_m + \frac{1}{3} (I_p - I_m)^2 \right)} = 7.11A \quad (7.5.5)$$

$$I_{ac(sec)} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{dc}^2} = 5.05A \quad (7.5.6)$$

变压器的匝数比为 $40/11.4 = 3.508$, 一次侧直流电流 $I_{dc(pri)} = 5/3.508 = 1.43A_{dc}$, 一次侧交流电流 $I_{ac(pri)} = 5.05/3.508 = 1.44A_{rms}$ 。顺向式转换器的磁通形式为半波, 输出功率 = 57W, 操作频率为 100KHz, 最大室温为 25 度, 最大温升为 50 度。

7.5.2 Magnetics Designer 的设计步骤

首先选取适用的铁芯与材质, 当使用者输入频率值后, 铁芯精灵会自动选取适当的铁芯尺寸, 如果需要使用者修改显示于下方之铁芯数据库, 亦可选取 "Lock" 固定以选取之尺寸或由程序自动最佳化处理尺寸大小, 然后在变压器窗口中输入相关绕组电压值与电流值等规格。首先在铁芯的资料窗口中选择材料与族系为 Family POT Ferrite, 如图 7.5.3 所示。然后填入 Frequency=100k, Power=57, 供货商 (Vendor) 选定 Vendor MAGNETICS, 点选 Auto Select, 此时的铁芯几何形状 (Geometry) 为 Geometry 18mm x 11mm, 最后点选 Apply, 铁芯浏览器将会选择最小的铁芯以符合所需要的频率与功率规格。

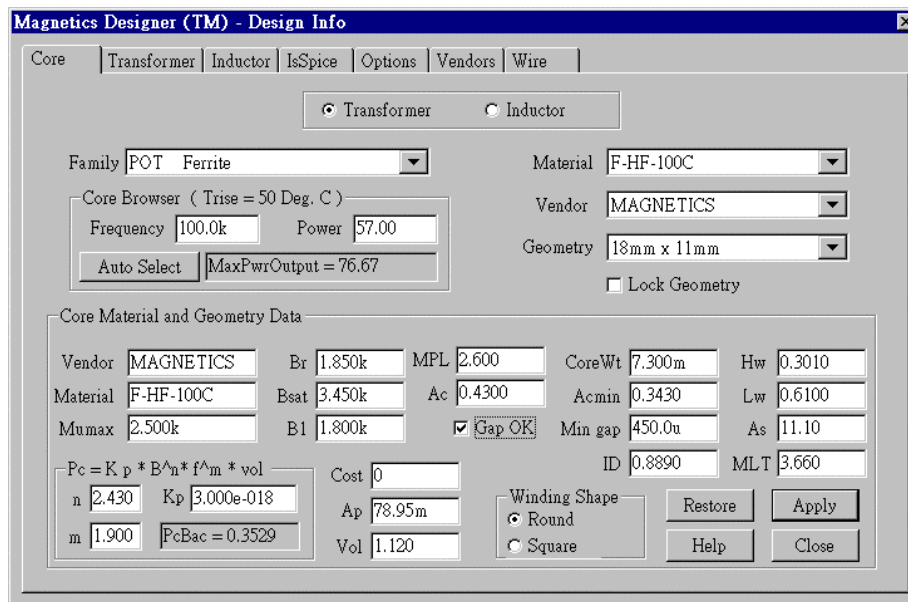


图 7.5.3 铁芯的资料窗口

将铁芯的资料窗口切换到变压器设计窗口，如图 7.5.4 所示。在 Frequency (Hz) 中键入操作频率 100K (100KHz)，在 Waveform 中选择 Square (方波)，由于方波含有较高的谐波成分，点选此项可以计算交流损失 (AC losses)。在 Flux Swing 的选项中选择 Half Wave (磁通形式为半波)。接着，在变压器设计窗口的左下角点选 **Add**，此时增加二次侧绕组与去磁绕组。将鼠标移到 Volts Avg Specified 的字段填入一次侧电压为 40，在 AC Current 的字段填入 1.44 (1.44Arms)，在 DC Current 的字段填入 1.43 (1.43Adc)。接着填入二次侧绕组的资料，Volts Avg Specified 的字段填入二次侧电压为 11.4，在 AC Current 的字段填入 5.05 (5.05Arms)，在 DC Current 的字段填入 5 (5Adc)。接着填入去磁绕组的资料，Volts Avg Specified 的字段填入一次侧电压为 40，在 AC Current 的字段填入 0.2 (0.2Arms)，在 DC Current 的字段填入 0 (0Adc)。在 Trise (max) 的字段中填入最大允许之温升值 50 度，在 Kwindow 的字段中填入绕线窗利用因子 (Window utilization factor, Kw) 为 90%。

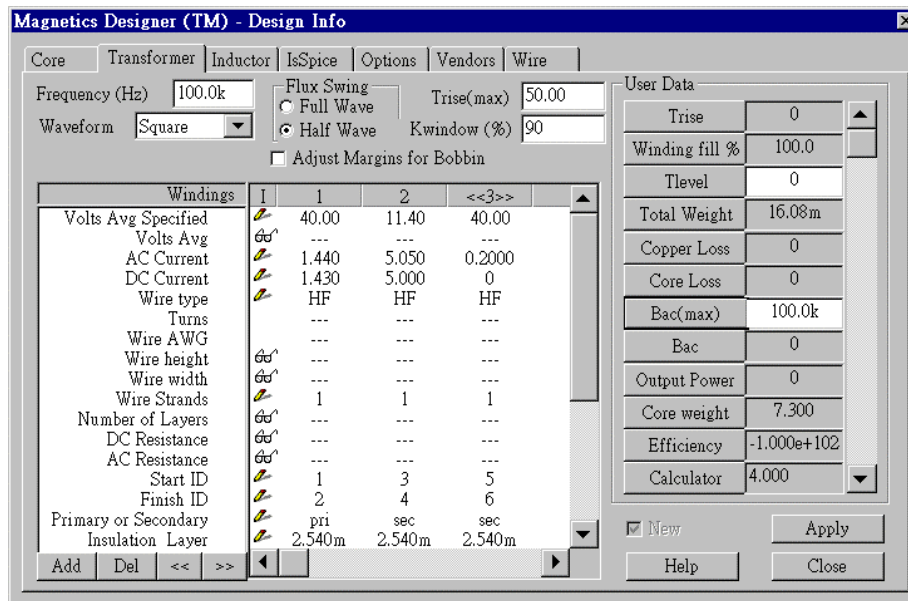
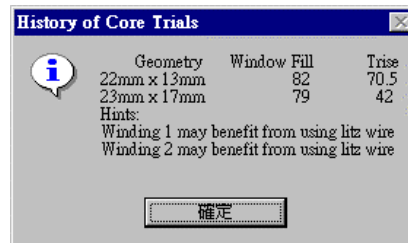


图 7.5.4 变压器设计窗口

再回到变压器设计窗口，点选右下角的 **Apply**，紧接着产生 History of Core Trials 的对话框，此对话框包括 Magnetics Designer 建议的铁芯几何形状 (Geometry)、绕线百分比 (Window Fill) 与温升 (Trise)。此对话框还会有绕线方式的提示，Magnetics Designer 会建议使用者切割最高的功率绕组而组或两组以上的导线使用并联绕线的方式，在铁芯下，使用并联绕线的方式会得到较佳的温升效果。此外，Magnetics Designer 也会根据交流电阻与直流电阻的比值建议使用者绕线的材质，此材质可以是多芯绞线 (Litz wire) 或是薄片式导线 (Foil)... 等等。



线窗的外，此采用两相同的

由上图 History of Core Trials 的对话框可以得知，Magnetics Designer 选择了两个铁芯几何形状 22mm*13mm 与 23mm*17mm，由温升 42 度与绕线窗的绕线百分比 79% 选择 23mm*17mm 比较符合设计需求。点选确定，变压器设计窗口中的参数已经做了修正，如图 7.5.6 所示。

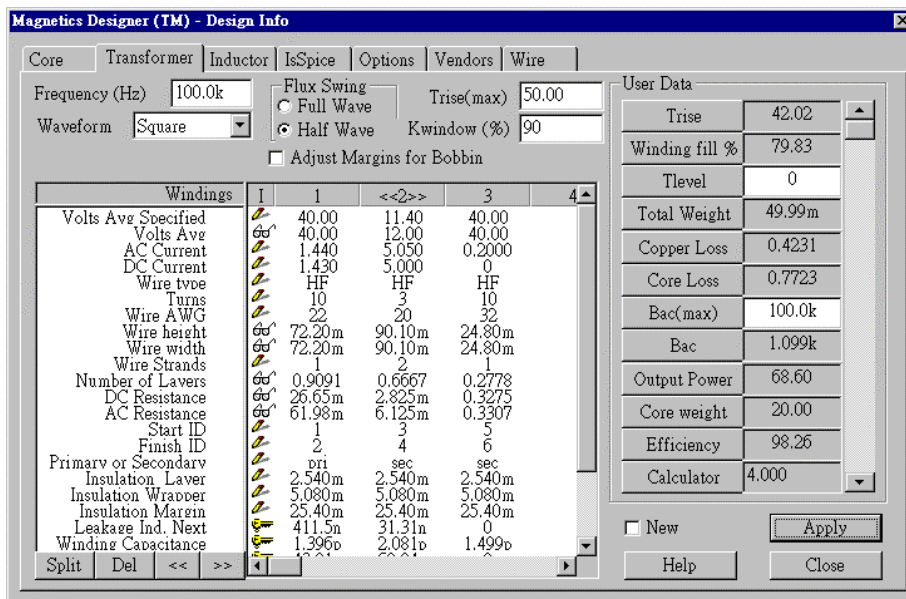


图 7.5.6 输入绕组电气规格后的变压器设计窗口

如图 7.5.6 所示的变压器设计窗口有满足设计要求的规格，但是仍然有需要改进。由上图 History of Core Trials 的对话框可以看出，较小的铁芯几何形状 22mm*13mm 的温升为 70.5 度与绕线窗的绕线百分比 82%，这项资料提供了改进的空间。Magnetics Designer 是根据变压器设计窗口中的资料变更来选择不同的铁芯几何形状，而铁芯几何形状的改变会明显的影响到变压器的特性。此时回到铁芯的资料窗口，我们选定了铁芯的几何形状为 22*13mm，并且点选了 Lock Geometry 这个选项，最后点选 ，如图 7.5.7 所示。

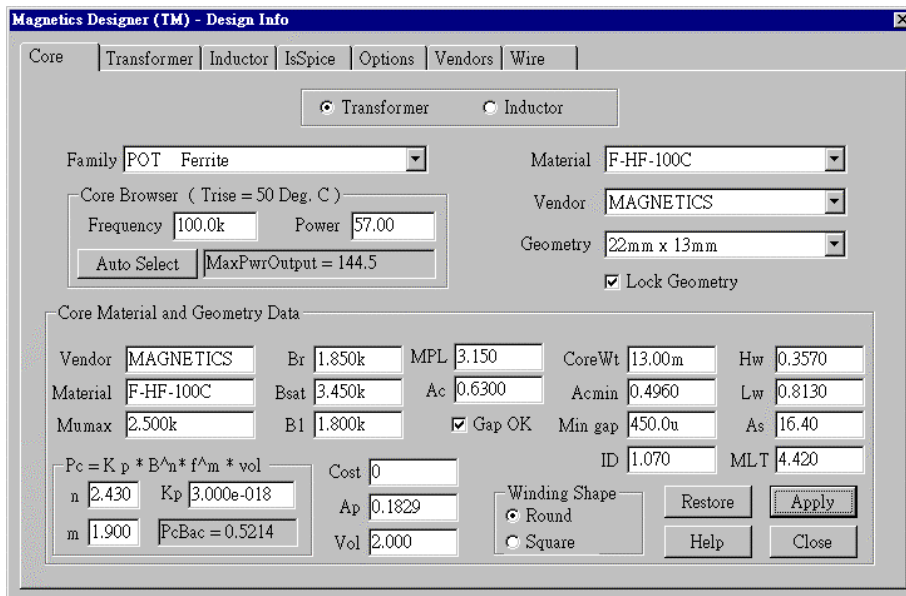
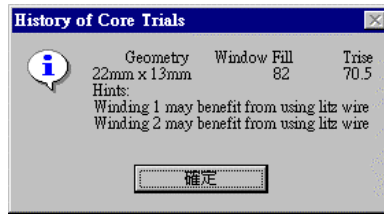


图 7.5.7 回到铁芯的资料窗口固定铁芯几何形状为 22mm*13mm

由于我们已经改变了铁芯的几何形状，此时必须立刻回到变压器设计窗口点选

New 这个选项，然后接着按下 ，紧接着图所示的 History of Core Trials 的对话框，此温升为 70.5 度，绕线窗的绕线百分比 82%。点选 ，变压器设计窗口中的参数已经做了修 Magnetics Designer 会针对最新选定铁芯的几何更新绕组的特性，如图 7.5.8 所示。由于温升的数值 (70.5 度) 已经超过我们所设定的限制 (50 度)，第一绕组与第二绕组的交流电阻远大于直流电阻，而铜损也大于铁损 3~4 倍左右，History of Core Trials 的对话框提供了提示，一次侧与二次侧绕组更改绕线材质为多芯绞线 (Litz wire) 的方式来作设计。



产生如时得到正，形状来

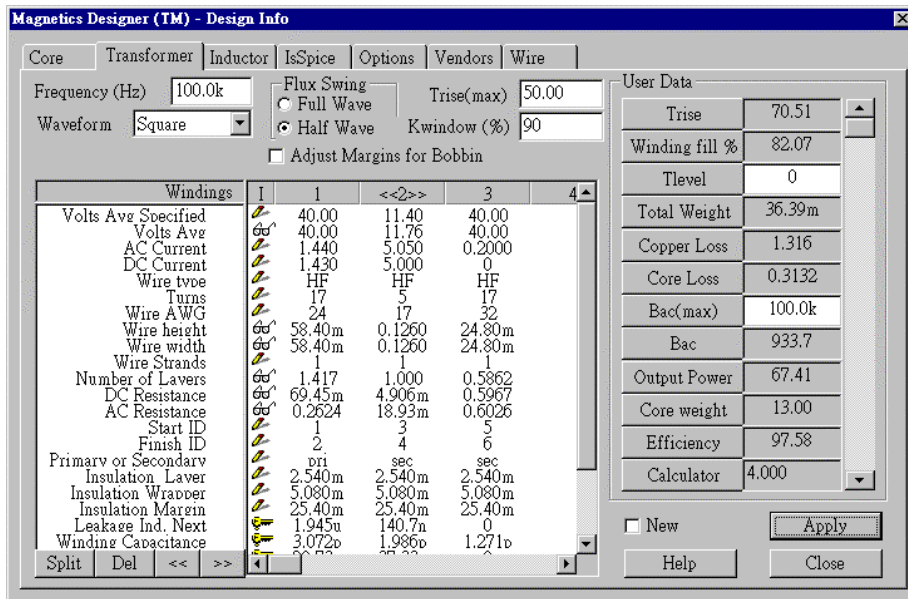


图 7.5.8 固定铁芯几何形状为 22mm*13mm 后的变压器设计窗口

此时我们使用一般实作上较常用的切割绕组来达到改进的效果。点选第一组绕组的任一参数，在变压器设计窗口的左下角点选 ，此时增加与第一组绕组相同的第四组绕组，如图 7.5.9 所示。

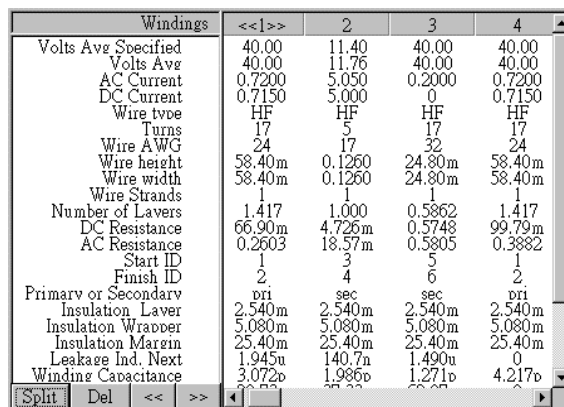
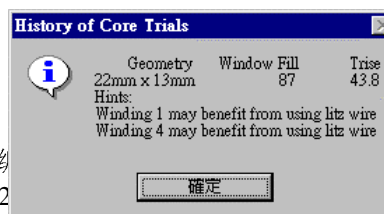


图 7.5.9 切割一次侧绕组后增加第四组绕组

注意此时的 AC Current 与 DC Current 的额



定值已

经成为原来的一半了，此时的第一组绕组与第二组绕组的交流电阻仍然是直流电阻的 2 倍左右，交流电阻的数值愈大代表高频操作所产生的集肤效应与邻近效应愈明显。另外铜损若远大于铁损也是一个参考的依据，在此变压器窗口右边的 User Data 中可以得知，铜损大于铁损 2 倍左右。完成后点选 New 这个选项，然后接着按下 ，紧接着产生如图所示的 History of Core Trials 的对话框，点选 ，变压器设计窗口中的参数已经做了修正，如图 7.5.10 所示。

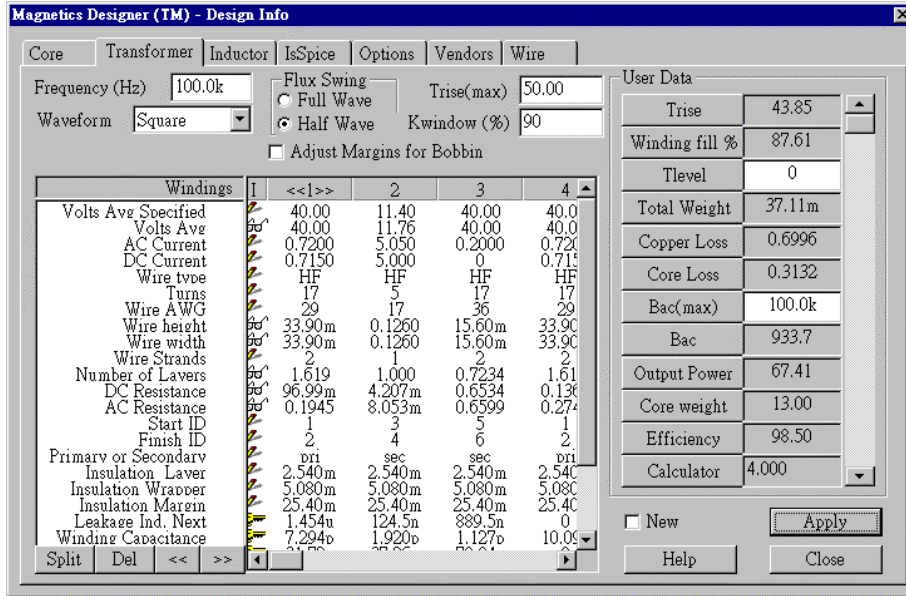
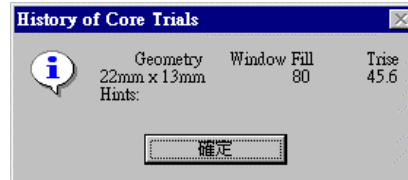


图 7.5.10 切割一次侧绕组后的变压器设计窗口

此时可以发现，第二组绕组的交流电阻仍些，而铜损也远大于铁损。这里我们针对二次(二组)绕组作绕线材质的修正，点选第二组绕组 type 将 HF 更改为 Litz，也就是使用多芯绞线制，如图 7.5.11 所示。完成后点选 New 这个选项，然后接着按下 ，紧接着产生如图所示的 History of Core Trials 的对话框。

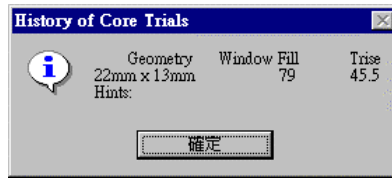


然大了侧 (第的 Wire 来绕选项，

Winding	1	2	3	4
Volts Avg Specified	40.00	11.40	40.00	40.00
Volts Avg	40.00	11.76	40.00	40.00
AC Current	0.7200	5.050	0.2000	0.7200
DC Current	0.7150	5.000	0	0.7150
Wire type	HF	Litz	HF	HF
Turns	17	5	17	17
Wire AWG	29	17	36	29
Wire height	33.90m	0.1780	15.60m	33.90m
Wire width	33.90m	0.1780	15.60m	33.90m
Wire Strands	2	1	2	2
Number of Layers	1.619	1.667	0.7234	1.619
DC Resistance	97.48m	5.449m	0.8588	0.1772
AC Resistance	0.1950	5.449m	0.8674	0.3544
Start ID	1	3	5	1
Finish ID	2	4	6	2
Primary or Secondary	pri	sec	sec	pri
Insulation Layer	2.540m	2.540m	2.540m	2.540m
Insulation Wrapper	5.080m	5.080m	5.080m	5.080m
Insulation Margin	25.40m	25.40m	25.40m	25.40m
Leakage Ind. Next	3.252u	403.1n	1.153u	0
Winding Capacitance	7.294p	3.809p	1.166p	12.58p

图 7.5.11 将二次侧(第二组)绕组的绕线材质更改为 Litz

当我们固定铁芯几何形状 22mm*13mm，由温 45.5 度与绕线窗的绕线百分比 79%是符合设计需 而一次侧绕组与二次侧绕组的交流电阻接近于直阻，铜损约等于铁损。点选 后，变压器 口中的参数已经做了最终的修正，如图 7.5.12



升 求的， 流 电 设计窗 所示。

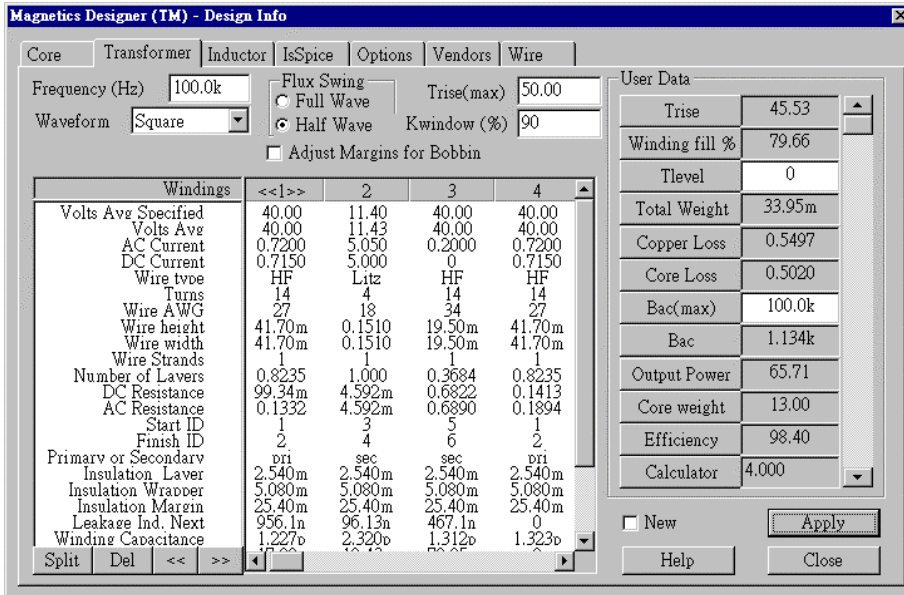


图 7.5.12 二次侧绕组的绕线材质更改为 Litz 后的变压器设计窗口

7.5.3 Magnetics Designer 的独特功能

Magnetics Designer 拥有两个独特的功能，第一个独特的功能是建立了我们所设计的变压器与电感转换为 SPICE 模型的能力，完成了变压器的参数输入以后，进入 IsSpice 的资料窗口，如图 7.5.13 所示。这里表示此例的变压器设计数据转换为电路符号与 SPICE 兼容的子电路串接文件(subcircuit netlist)模型窗口，此模型包括所有的铁芯损与铜损、交流与直流电阻、漏电感与磁化电感和绕组电容。使用者可应用此 SPICE 模型经由在实际生产制造变压器或电感之前，使用 IsSpice 仿真验证设计结果。

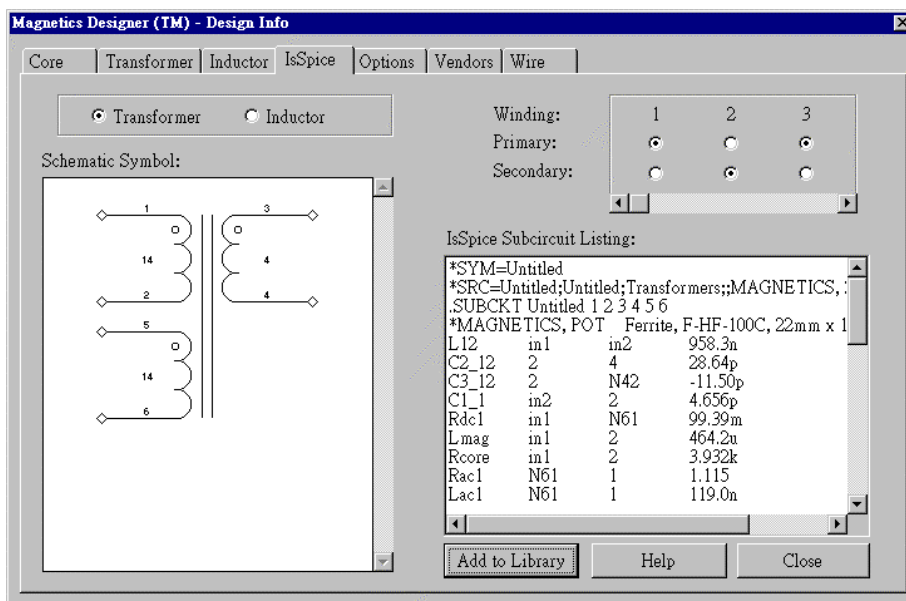

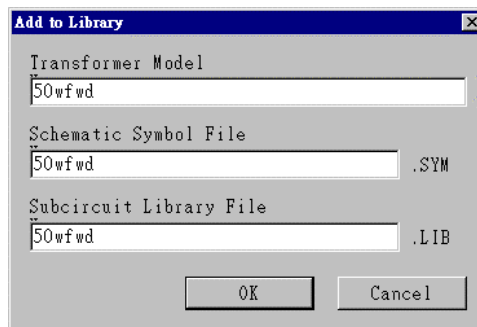


图 7.5.13 Magnetics Designer 针对设计完成的变压器来产生 SPICE 模型

在 IsSpice 的资料窗口中点选 ，此时出现 Add to Library 的对话框。在 Transformer Model 中填入此变压器的名称(此例中为 50wfd)，在 Schematic File 中填入组件符号名称，此组件符号名(50wfd.sym) 必须储存在 c:\Spice8Rx\sn\symbols 的目录下，在 Scbcircuit Library File 中填入组件模型名称(50wfd.lib) 必须储存在 C:\Spice8Rx\pr 的目录下。接着回到 WIN95 的管脚，在 C:\Spice8Rx\sn 的目录下寻找档案 sym.@@@，然后使用记事本打开，在最后一行填入..\sn\symbols\50wfd.SYM，储存原来的档案。由于 Magnetics Designer 的原始设计是支持 SpiceNet7.x 的版本，在目前所使用的 SpiceNet8.x 的版本上必须做一修正。

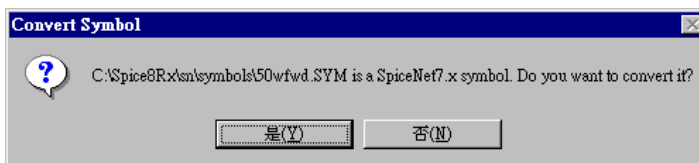


对话框
器组件
Symbol
名称

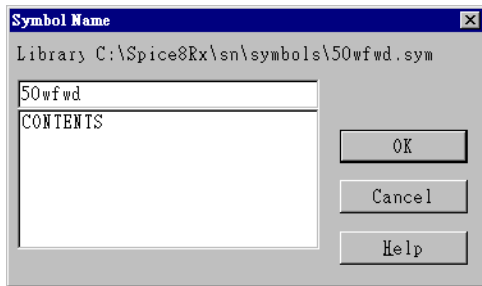


称，此
档案总
名即
持

所以此时我们必须回到 SpiceNet 电路图编辑器，在主选单中点选 Edit/Edit Symbol 进入符号编辑器，在符号编辑器的主选单中点选 File/Open Symbol 开启 50wfd.sym，此时画面上出现一个



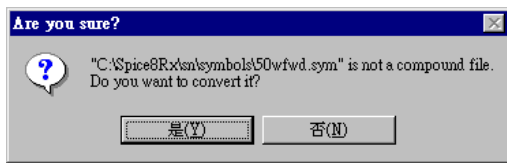
Convert Symbol 的对话框，目的是询问使用者是否将 SpiceNet7. x 的版本转换为目前所



使用的 SpiceNet8. x 的版本，此时点选 ，我们之前在 Magnetics Designer 中建立的组件就出现在画面上，接着在符号编辑器的主选单中点选 File/Save Symbol，为了存回原来的档名，我们在文件名称中填入 50wfd，此时画面上出现一个 Are you sure? 的对话框，目的是询问使用者是否转换为 SpiceNet8. x 所使用的档案，此时点选



进入 Symbol Name 的对话框，然后填入组件名称后点选 跳出，此时整个转换过程结束。最后



回到程序集中的 ICAP_4Rx 作 MakeDB，在 MakeDB 的对话框中点选 后，整个建立变压器的设计步骤与过程宣告完成。我们回到 SpiceNet 电路图编辑器，在主选单中点选 Parts/Parts Browser 进入组件浏览器，在变压器组件资料中就可以找到我们所建立的组件 (50wfd MAGNETICS, 22mm*13mm) 了，如图 7. 5. 14 所示。

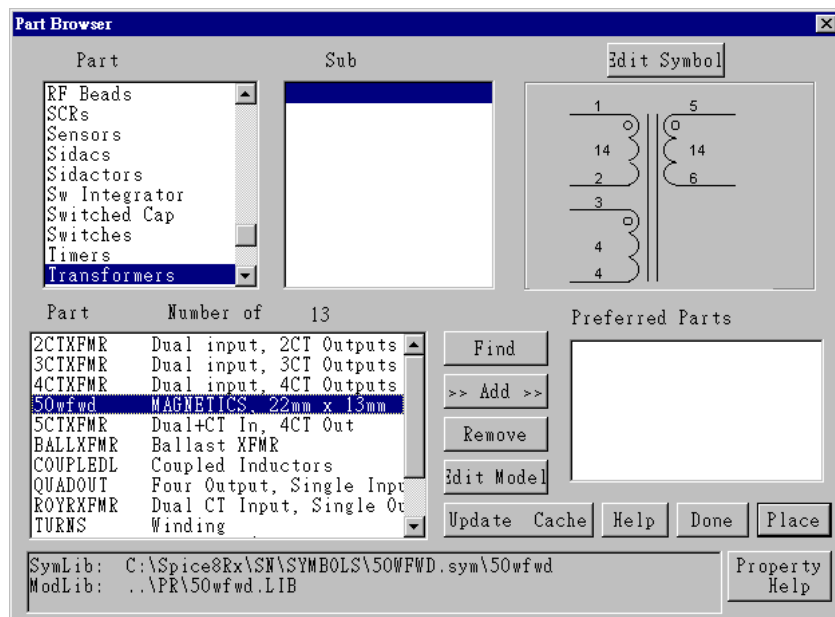


图 7. 5. 14 自建完成的电感器模型可提供 IsSpice 做电路仿真

7. 5. 4 IsSpice 的电路仿真结果分析

图 7. 5. 15 是使用 Magnetics Designer 作一个 50W 顺向式转换器的变压器设计，其 SpiceNet 电路图与 IsSpice 的仿真结果。IsSpice 包含了许多 PWM IC、功率半导体与电

力电子组件模型，当 IsSpice 的电路仿真功能与 Magnetics Designer 的磁性组件设计功能结合后，两者所能描述的电路与电气特性更加接近实际的应用电路，这是其它仿真软件所无法比拟的。

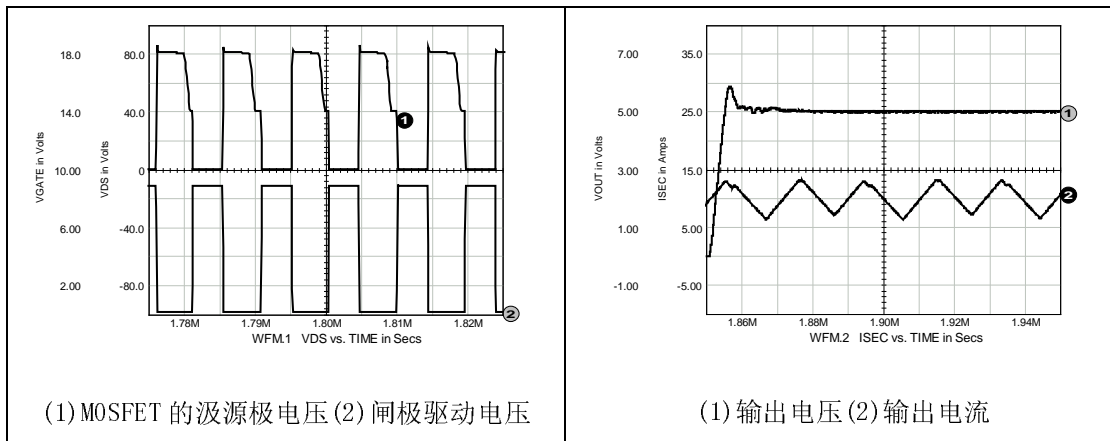
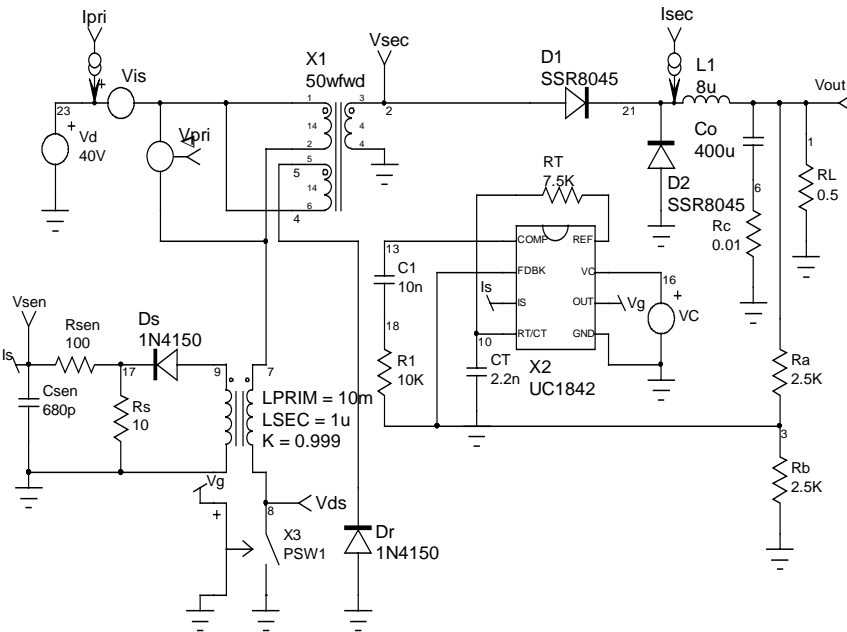


图 7.5.15 50W 顺向式转换器的 SpiceNet 电路图与 IsSpice 的仿真结果

Magnetics Designer 第二个独特的功能是计算变压器与电感特性之数学方程式与计算法则。以一个新的温度变量为范例，如图 7.5.16 所示的温升方程式对话框。温度方程式是使用铜损、铁损、铁芯截面积与室温参数，举例来说，使用者可直接读取如输出功率或漏抗等数值，亦可观察计算此数值之数学方程式。而使用者除了可以自行修改数学方程式，亦可加上使用者定义选项后，重新计算之变压器窗口，使 Magnetics Designer 变成使用者特定用途之特殊应用软件。

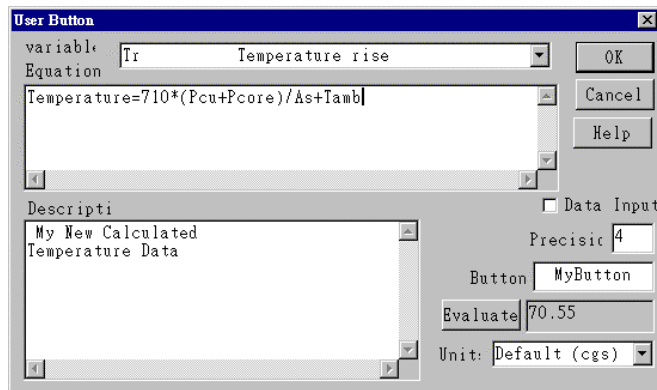


图 7.5.16 温升方程式的对话框

7-5-4 Magnetics Designer 输出报告

当使用者设计完成变压器或电感后, Magnetics Designer 会将电气特性与绕组规格产生完整的输出报告。针对本文的变压器设计, 在主功能栏中选取 Reports/Transformer Winding Sheet, 这是用来说明如何制造变压器与电感, 可提供制造商制作。绕组规格表中含有相关的铁芯材质与绕制规格(匝数、绕线线径与型式、绝缘层厚度等)等数据, 如图 7.5.17 所示。在主功能栏中选取 Reports/Transformer Summary, 这是关于电气特性的功能报告表, 包含铁芯的制造商、尺寸、电气规格等资料, 如图 7.5.18 所示。

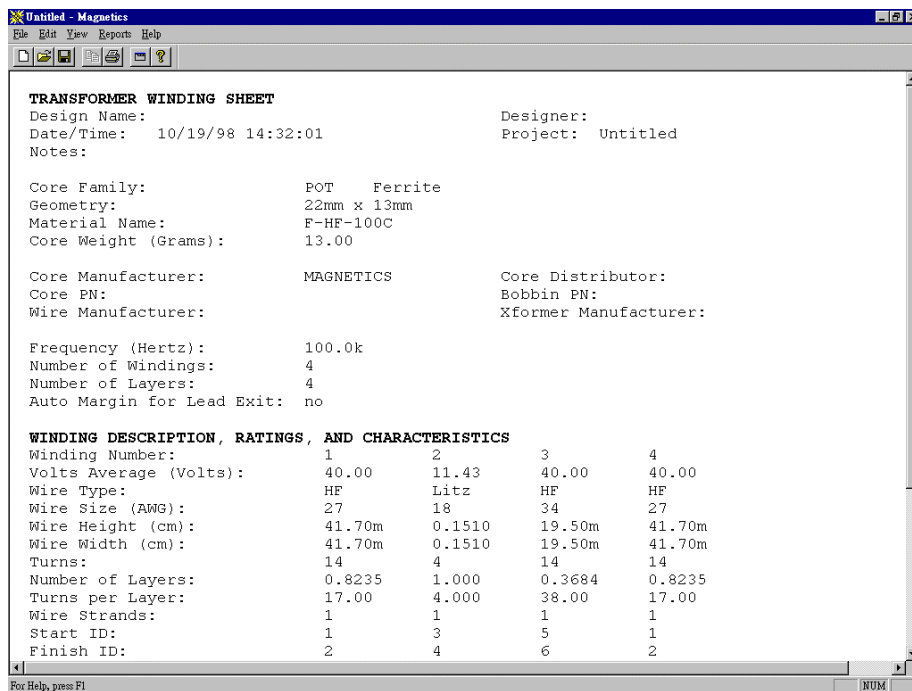


图 7.5.17 可提供制造商的绕组规格表(Transformer Winding Sheet)

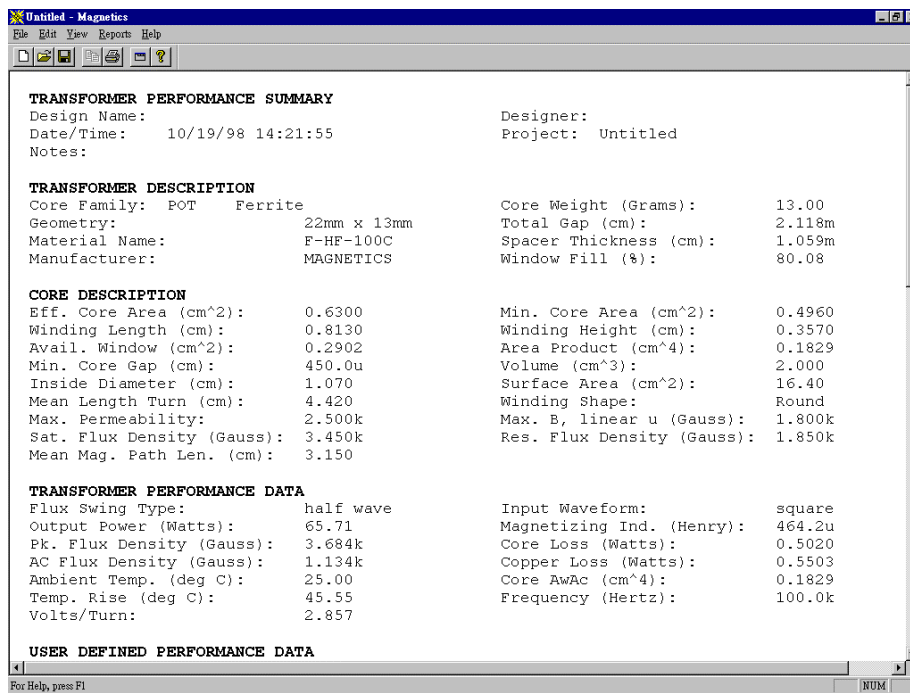


图 7.5.18 电气特性的规格报告表(Transformer Summary)

参考资料：

- [1]“Magnetics Designer Application Note”, Intusoft, 1997.
- [2]S. M. Sandler, ”SMPS Simulation with SPICE 3”, McGraw-Hill Companies, 1997.