

# Pspice 电路仿真中变压器模型的使用

张东辉<sup>1,2</sup> 严萍<sup>1</sup> 高迎慧<sup>1</sup> 孙鹤鸿<sup>1</sup>

(1. 中国科学院电工研究所 100080 2. 中国科学院研究生院 100039)

**摘要** 详细阐述了 Pspice 电路仿真中变压器模型的使用方法和注意事项, 包括通用线性变压器模型、由线性磁心模型构成的线性变压器模型、具有磁滞现象和饱和特性的非线性磁心构成的非线性变压器模型。还介绍了利用电压控制电压源和电流控制电流源构成的具有交流和直流传输特性的理想变压模型。另外, 提出了利用模型编辑器建立非线性磁心模型的两种方法: 参数提取法和试错法, 并且设计了测试电路对磁心模型进行测试。

**关键词** 计算机辅助分析 Pspice 变压器 EDA

## 1 引言

利用计算机辅助设计的方法设计电力电子电路, 可以提高设计工作的生产率和设计质量<sup>[1]</sup>。Pspice 仿真软件以其通用性、准确性和高效性等优点在电力电子电路辅助分析领域发挥了重要的作用。变压器和磁性元件是电力电子电路中重要的组成部分, 如何在电路仿真中使用它们往往决定了仿真结果对实际电路指导作用的正确与否。

Pspice 仿真软件中包含多种变压器, 其中线性变压器 (XFRM\_Linear) 和由线性磁心 (K\_Linear) 构成的线性变压器在特定情况下可以当作理想变压器使用<sup>[2]</sup>。由非线性磁心构成的非线性变压器存在磁滞现象和饱和特性, 应用时可以很好地反映实际情况。另外, 电力电子电路进行稳态分析和小信号分析时常常需要直流变压器模型, 实际电路中却不存在, 可以通过电压控制电压源和电流控制电流源构成理想变压器模型。

Pspice 仿真软件包含模型编辑器 (Model Editor) 组件, 可以利用模型编辑器对非线性磁心的  $B-H$  回线进行修改, 当符合要求时提取 Jiles-Atherton 参数, 根据参数选取所需要的磁心。还可以利用试错法 (Trial and Error), 通过修改 Jiles-Atherton 参数来测试  $B-H$  回线是否符合要求, 根据最后确定的 Jiles-Atherton 参数选取磁心进行试验研究。

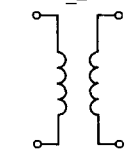
## 2 线性变压器的使用

### 2.1 线性变压器的使用

线性变压器 (XFRM\_Linear) 在 analog.olb

库中, 如图 1a 所示。变压器的变比由一次侧和二次侧电感值决定, 变比为  $\sqrt{L_s L_p}$ ,  $L_p$  为变压器一次侧电感值,  $L_s$  为变压器二次侧电感值。变压器的耦合系数为  $K$ , 其取值范围为  $-1 \sim 1$  之间。对于常规的线性变压器可以取  $K = 1$ , 仅在变压器绕组不完全重叠时采用小于 1 的值。

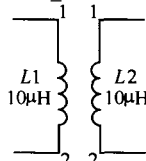
XFRM\_Linear



COUPLING=0.99  
L2\_VALUE=10μH  
L1\_VALUE=10μH

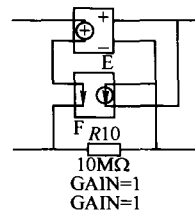
(a) 线性变压器 XFRM\_Linear

K\_Linear



10μH L1  
10μH L2  
K K1  
K\_Linear  
COUPLING=1  
L1=L2 L2=L2

(b) 由线性磁心 (K\_Linear) 构成的线性变压器



(c) 由受控源 (E和F) 构成的线性变压器

图 1 线性变压器模型

### 2.2 线性磁心构成的线性变压器的使用

线性磁心 (K\_Linear) 在 analog.olb 库中, 由线性磁心构成的线性变压器如图 1b 所示, 其使用方法和线性变压器 (XFRM\_Linear) 相似, 只是耦合电感自行设置, 至少要有两个耦合电感, 最多可以有六个电感耦合在一起。应该注意的是电感值的单位为亨利 (Henries), 电感器连接时注意同名端的位置。

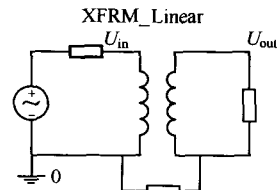
### 2.3 受控源构成的线性变压器的使用

为了更好地设计电力电子电路, 需要对电路的稳态电路和小信号电路进行分析和仿真, 这时会用到直流变压器, 然而在实际中却不存在。在 Pspice 仿真软件中, 可以利用电压控制电压源和电流控制电流源构成理想变压器, 使之符合如下关系: 一次侧和二次侧电压之比等于二次侧和一次侧的电流之比。受控源构成的线性变压器如图 1c 所示, 其变比由受控源的连接和增益 (Gain) 决定。受控电压源和受控电流源的增益互为倒数。使用该变压器时应注意: 电压控制电压源的被控端不能与电压源相连, 电流控制电流源的被控端不能与电流源相连, 否则电路仿真时会发散。如果仿真时在变压器的一次侧和二次侧分别加上一个小电阻, 仿真时收敛性会更好。

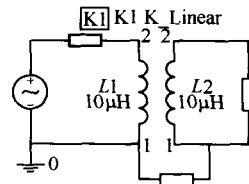
### 2.4 线性变压器的应用

使用线性变压器 (XFRM\_Linear) 和由线性磁心 (K\_Linear) 构成的线性变压器时应该注意其励磁电感的影响。Pspice 仿真软件中线性变压器的励磁电感可以近似为一次侧电感。在图 2 电路中, 激励源为正弦信号, 幅值为 100V; 变压器的一次侧和二次侧电感值同为  $10\mu\text{H}$ ; 励磁电感近似为  $10\mu\text{H}$ ; 受控源的增益同为 1; 负载电阻为  $100\Omega$ ; 激励源串联等效电阻为  $0.1\Omega$ 。仿真结果如图 3 所示。

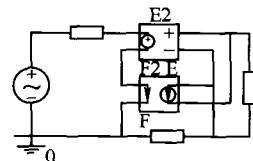
图 3a 所示图形为瞬态仿真波形。从图中可以看出, ①图 2c 电路的输入与输出信号完全一样, 所以受控源组成的线性变压器可以认为是理想变压器。②由线性变压器 (XFRM\_Linear)、线性磁心 (K\_Linear) 和其近似等效电路构成的变压电路输出信号一致, 可以说明由线性变压器、线性磁心和其近似等效电路构成的变压电路特性一致, 等效电路可以认为是合理的, 但是输出信号滞后于输入信号, 说明 Pspice 中变压器与实际非常相似, 能够很



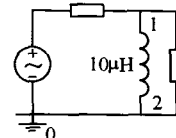
(a) 由线性变压器 (XFRM\_Linear) 构成的变压电路



(b) 由线性磁心(K\_Linear)构成变压器的变压电路



(c) 由受控源构成变压器的变压电路



(d) (a)和(b)的近似等效电路

图 2 线性变压器构成的变比为 1 的变压电路  
好地反映实际电路的工作情况。

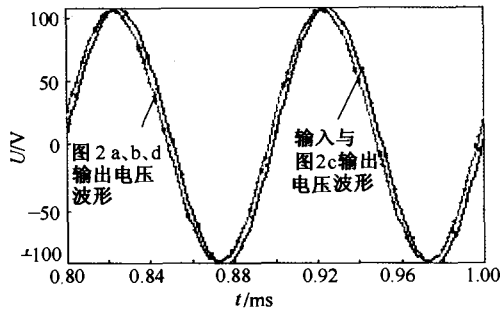
图 3b 表示激励源幅值为 100V, 频率从 1Hz ~ 1MHz 扫描时的输出电压波形。从图中可以看出由受控源构成的线性变压器不受频率的影响, 线性变压器和其等效电路受频率的影响很严重, 主要是由于励磁电感的影响。当频率很高时励磁电感的影响很小, 线性变压器近似理想变压器。所以通过频率扫描可以检测耦合电感量和激励源的频率是否合适, 电路设计是否合理。

图 3c 表示激励源幅值为 100V, 频率为 10kHz 时, 对图 2b 电路的耦合电感量进行参数扫描时的输出电压幅值波形。可以看出随着耦合电感量的增加输出电压的幅值逐渐增大。所以当激励源确定时, 可以通过参数扫描来确定变压器的耦合电感值, 使变压器能够更好地工作。

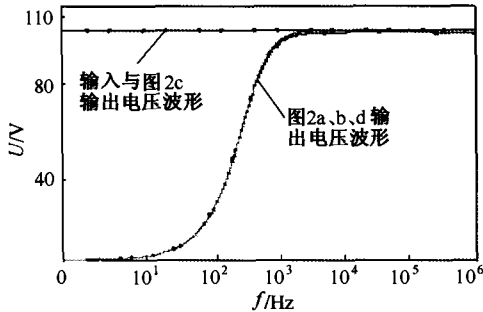
## 3 非线性变压器的使用和非线性磁心的建立

### 3.1 非线性变压器的特性及应用

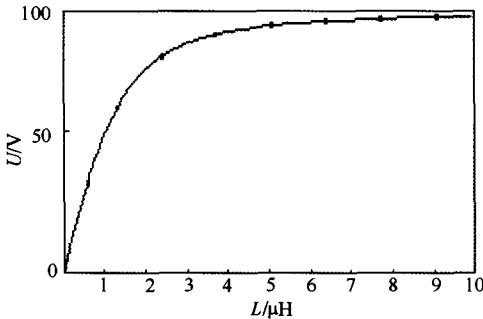
#### 3.1.1 非线性变压器的特性



(a) 时域分析时电路输出电压波形



(b) 频域分析时电路输出电压波形



(c) 图 2b 中耦合电感值变化时输出电压波形

图 3 线性变压器的传输特性

非线性变压器的特性主要由非线性磁心决定。

Pspice 仿真软件中有四种非线性变压器模型, 如图 4 所示。这些模型属于 BREAKOUT.olb 库。通过修改变压器的 Implementation 属性来改变变压器的非线性磁心, 从而改变变压器的特性。非线性磁心在 magnetic.olb 库中。例如 Implementation =

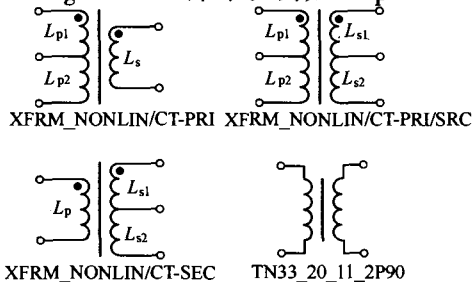


图 4 非线性变压器模型

E13\_6\_6\_3E5, 变压器的特性将由非线性磁心 E13\_6\_6\_3E5 决定。非线性变压器的使用方法和线性变压器一样, 只是变比由一次和二次绕组匝数决定。

非线性磁心 Kbreak 放在 BREAKOUT.olb 库中, 可以作为通用的非线性磁心使用。和非线性变压器一样, 只要把 Implementation 属性改为相应的非线性磁心模型就可以应用了, 使用方法和线性磁心 K\_Linear 一样, 只不过耦合电感的单位是绕组匝数而不是亨利。

### 3.1.2 非线性变压器的应用

图 5 表示激励源为正弦波、非线性变压绕组匝数比为 10、非线性磁心模型为 I93\_28\_30\_3C85 的升压电路, 磁心 I93\_28\_30\_3C85 的模型参数如下:

```
.MODEL I93_28_30_3C85 CORE
+ MS = 376.91e + 3 A = 22.015 C = 0.14355 K =
20.230
+ AREA = 8.3600 PATH = 21
```

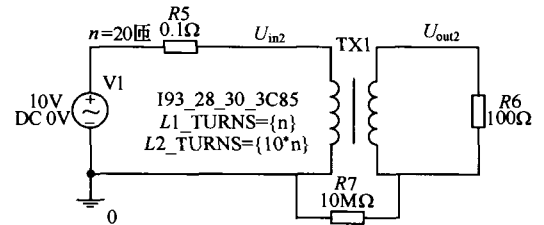


图 5 变比为 10 的非线性变压器电路

当激励源的频率确定、绕组匝数之比确定时, 由于磁心非线性, 变压器的输出电压随匝数增加接近理想变压器, 如图 6a 所示。当激励源的频率变化时, 对于相同的非线性变压器, 不同的耦合系数决定不同的传输特性, 如图 6b 所示。上述特性恰好表明了实际变压器的传输特性。当选用符合型号的非线性磁心构成变压器时, 应该根据实际情况选定耦合系数和绕组匝数进行电路仿真, 这样仿真结果才能更加接近实际。同样可以利用仿真选择绕组匝数, 对试验研究进行指导。

### 3.2 非线性磁心的建立

由于实际中所使用的变压器通常为磁心变压器, 所以必须考虑变压器磁化曲线的非线性。Pspice 根据 Jiles-Atherton 模型建立非线性变压器模型, 以及相应的磁心模型库 (magnetic.olb)。非线性磁心模型参数和模型程序如表 1 所示。设计者可

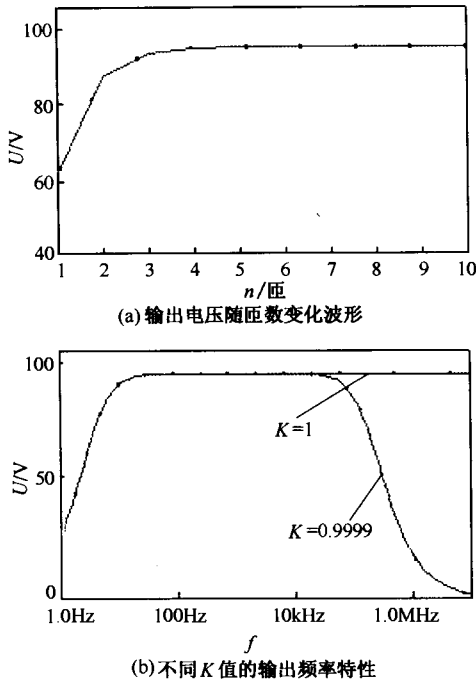


图6 采用非线性磁心时变压器的传输特性

以利用 Pspice 中的模型编辑器 (Model Editor), 采用参数提取法 (Parameter Extract) 和试错法 (Trial and Error) 建立所需磁心, 下面分别介绍两种方法。

表1 Pspice 非线性磁心模型参数和模型程序

参数	单位	最小值	最大值	缺省值	意义
LEVEL		1	2	2	磁心等级
GAP	cm	0	1e+030	0	有效空气隙长度
MS	A/m	1	1e+030	1e+06	饱和磁化强度
A	A/m	10	1e+030	1000	形状参数
C		0.01	1e+030	0.2	磁畴壁的挠曲系数
K	A/m	0	1000	500	磁畴壁的销连系数
AREA	cm <sup>2</sup>	1e-006	1e+030	0.1	平均磁心有效截面积
PATH	cm	1e-006	1e+030	1	平均磁路长度
PACK		1e-006	1e+030	1	叠层系数

举例:

.MODEL K528+500-3C8 CORE (MS=420e+3 A=26 K=18 AREA=1.17 PATH=8.49)

### 3.2.1 参数提取法建立非线性磁心

通常情况下, 变压器设计者可以通过  $B-H$  回线选择磁心, 但是仅仅从  $B-H$  回线很难确定铁磁心参数。设计者可以使用 Pspice 仿真软件的模

型编辑器 (Model Editor), 通过对磁心模型  $B-H$  回线进行修改得到所需  $B-H$  回线, 然后通过参数提取就可以得到 Jiles-Atherton 模型参数, 从而进行磁心型号的选择。利用模型编辑器提取磁心参数具体步骤如下:

(1) 在 Model Editor 中选择 File/New, 保存为新的库名, 然后选择 Model/New, 输入将要建立的模型名称, 选择 Magnetic Core, 点击 OK 就可以进入模型编辑界面了, 如图 7 所示。

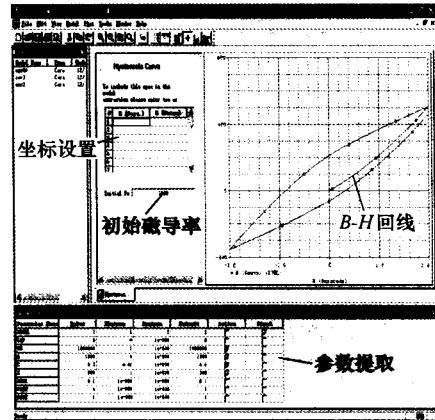


图7 非线性磁心编辑界面

(2) 根据要求输入初始磁导率, 如图 7 中 Initial Permeability 设为 10 000。

(3) 输入  $B-H$  回线与  $B、H$  轴在第一象限的交点, 如 (0, 600), (0.04, 0)。

(4) 输入  $B-H$  回线的闭合点, 如 (0.4, 3000)。

(5) 在  $B-H$  回线第一象限两分支上分别输入坐标点, 如 (0.12, 2200), (0.12, 1600)。

(6) 设置坐标轴, Plot/Axis Setting, 如 X\_Axis 设为 -0.40, 0.40。

(7) 最后进行 Jiles-Atherton 参数提取, Tools/Parameters Extract。如:

MS=33.6e+4 A=10.93 C=0.481 K=4.308

平均磁路长度 PATH 和平均磁心有效截面积 AREA 并不是从  $B-H$  回线中提取出来的, 必须由设计者确定。本例中设定 AREA=1.17cm<sup>2</sup>, PATH=8.49cm, 其余参数采用缺省值。这样就完成了非线性磁心模型的建立, 并且进行了参数提取如图 8 所示。磁心建立过程中应该注意以下方面: ①应在第一象限  $B-H$  回线的下游设置坐标点。②模型编辑器把磁场的最大范围规定为 X\_Axis 的

范围，所以 X\_Axis 的设置非常关键。③许多手册中  $H$  的单位为  $A/m$ ，而模型编辑器中  $H$  的单位为 Oersted， $100A/m$  等于  $1.25Oersted$ 。④磁心建立过程中最好不要固定 Jiles-Atherton 参数，尤其是  $MS$ 、 $A$ 、 $C$ 、 $K$ ， $AREA$  和  $PATH$  参数值是由设计者根据实际情况设定的。⑤非线性磁心和线性磁心使用方法相似，只是耦合电感的单位为绕组匝数而不是电感量亨利。

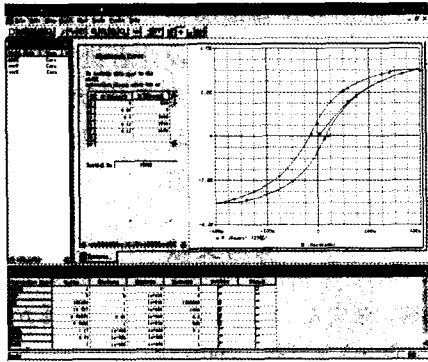


图 8 参数提取法建立的非线性磁心

### 3.2.2 试错法建立非线性磁心

还可以利用试错法对磁心参数进行修改，得到所需的  $B-H$  回线。具体步骤如下：首先设置  $K$  为零。这时  $B-H$  回线变为一条线，如同脊骨一样。设置  $MS = B_{max}/0.01257$ ， $B_{max}$  为所需最大磁通密度。然后调整形状参数  $A$  的值，直到接近想要的曲线。逐渐调节  $MS$  的值得到合适的饱和磁化强度。然后通过改变磁畴壁的销连系数  $K$  值修改磁滞回线的开阔程度，当得到合适的开阔程度后，轻微修改  $K$  值以协调剩余磁通和矫顽力。最后通过修改磁畴壁的挠曲系数  $C$  确定初始磁导率。这样磁心模型基本建立完成了，可以通过测试电路对其进行测试。

图 9 为磁心测试电路，对该电路进行瞬态仿真设置，时间长度为  $4s$ ，最大时间间隔为  $0.01s$ 。电感为  $20$  匝，磁心为 magnetic.olb 中的线性磁心 K528T00\_3C8 和用试错法建立的非线性磁心 cor2。为了验证所建立磁心的实用性，测试电路中新建磁心和实际磁心选用同样参数，从图 11 可以看出两个磁心的  $B-H$  回线完全重合，验证了所建磁心的正确性；通过比较图 10 和图 11 中的  $B-H$  回线，可以得出两图形无论从形状还是数值上都非常接近，说明使用此方法建立的磁心用于仿真

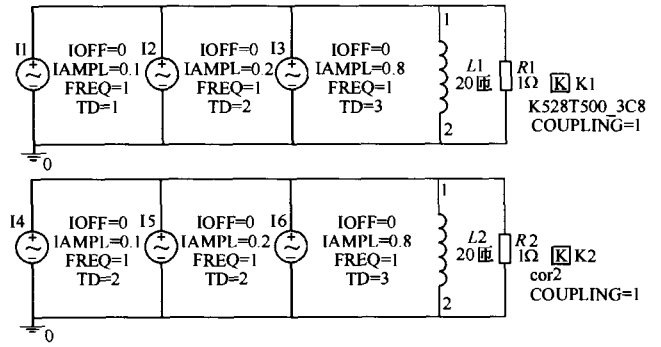


图 9  $B-H$  回线的测试电路

电路时可以反映实际情况，能够很好地指导试验研究。

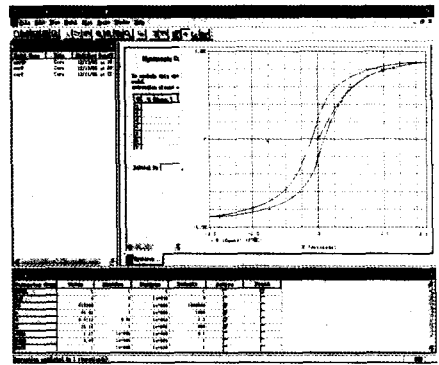


图 10 利用试错法建立非线性磁心的  $B-H$  回线波形

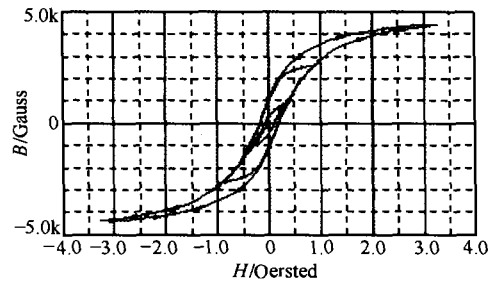


图 11 两种磁心的  $B-H$  回线的测试波形

由于耦合电感之间存在耦合系数的限制，所以当对多电感的耦合变压器进行瞬态分析的时候，电路可能发散。耦合电感之间存在固有特性，即耦合矩阵的值是绝对确定的。例如三电感耦合可以用下面的不等式来检验： $K_{12}^2 + K_{13}^2 + K_{23}^2 - 2K_{12}K_{13}K_{23} \leq 1$ ， $K_{ij}$  是第  $i$  和第  $j$  电感之间的耦合系数。

例如，如果  $K_{12} = 1$ ， $K_{13} = 0.9$ ， $K_{23} = 0.95$ ，等式的左面值为  $1.0025 (> 1.0000)$ ，系统是不收敛的。

如果  $K_{12} = 1$ ， $K_{13} = 0.9$ ， $K_{23} = 0.9$ ，等式的左面值为  $1 (= 1.0000)$ ，系统是收敛的。

### 4 变压器模型在开关电源中的应用举例

图 12 为 4V、2A 推挽输出开关电源的 Pspice 仿真原理图。分别利用非线性磁心 K528T00\_3C8 和线性磁心 K\_Linear 建立脉冲变压器模型，变比为 4 比 1。利用上述介绍的方法确定电感值和匝数。当开关频率为 22kHz 时，由非线性磁心构成的脉冲变压器一次侧取 40 匝、二次侧取 10 匝；由线性磁心构成时一次侧电感取 32 $\mu$ H、二次侧取 2 $\mu$ H。使用两种磁心构成的脉冲变压器仿真结果非常接近，如图 13 所示，输出电压和输出电流波形几乎完全重合，符合设计要求，耦合电感参数选择合理。但仿真 5ms 动态过程的时间，非线性磁心为 4.09s，线性磁心为 3.66s，可以考虑采用线性磁心构成的变压器进行仿真以减少仿真时间。

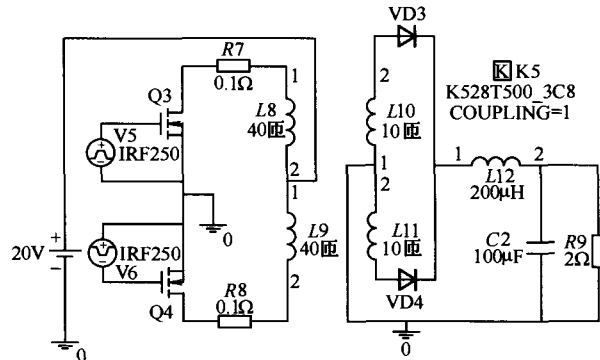


图 12 开关电源仿真原理图

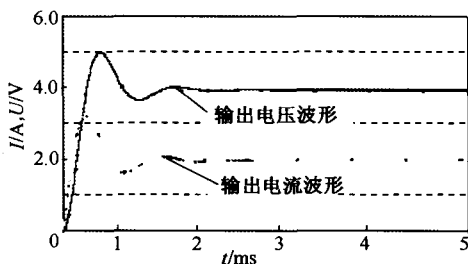


图 13 推挽电路仿真输出波形

### 5 结束语

Pspice 仿真电路中使用线性变压器模型时，由于励磁电感的存在，变压器的传输特性与工作频率有关，应当通过修改耦合电感值使变压器与激励源相匹配。由压控电压源和流控电流源构成的理想变压器，既可以传递直流能量又可以传递交流能量，

可以很好地应用于等效电路和小信号电路的分析和仿真。使用非线性变压器时应该注意非线性磁心的特性，正确选择耦合电感的匝数和耦合系数是使仿真与实际相一致的关键。模型编辑器可以用来建立非线性磁心模型，主要有参数提取法和试错法。前者通过拟和  $B-H$  回线得到磁心参数，后者通过反复修改磁心参数得到所需的  $B-H$  回线。两种方法都非常方便和有效，从而使仿真与实际更加接近。合理地使用变压器能够使开关电源仿真电路与实际情况更加接近。另外，设计者进行电路仿真之前一定要对电路的工作原理和工作状况非常了解，这样仿真才能够更快更准确地验证理论，从而对理论进行完善，以达到事半功倍。

### 参考文献

- [1] 郑颖楠, 张庆友. Pspice 在电力电子仿真方面的应用 [J]. 燕山大学学报, 2001 (4).
- [2] 王毅. PSPICE 在磁耦合电路教学中的应用 [J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2003 (4).
- [3] 陈建业. 电力电子电路的计算机仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 王辅春. 电子电路 CAD 与 OrCAD 教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] Muhammad H Rashid. Power electronics Handbook [M]. USA: Elsevier Science, 2001.
- [6] David Busdeicker. Using coupled inductors and inductor cores [G]. USA: OrCAD Technical Support, 2000.

### Using Methods of Transformer in Pspice

Zhang Donghui

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences)

**Abstract** Using methods and consideration of transformer model in Pspice simulation is outlined in details, including linear transformer and core model, nonlinear transformer and core model with hysteresis and saturation. Otherwise, introducing ideal transformer constituted of VCVS (voltage control voltage source) and CCCS (current control current source). In addition, presenting two ways for creating nonlinear core model using Model Editor, Parameters Extract and Trial and Error, and designing circuit to test core models.

**Keywords** computer-aid analysis Pspice transformer EDA

收稿日期: 2006-02-08