

3

IGBT 器件级模型建立及仿真

在 2.1.2 节“半导体器件模块”部分曾提到半导体器件分系统级（System Level）与器件级（Device Level）两大类。系统级模型是一种理想化的模块，而器件级模型比较复杂，是考虑了器件内部结构特性的行为模块。模型库中包含的器件级模块如下：

- Bipolar Junction Transistor: 双极晶体管模块
- Diode: 二极管模块
- Field Effect Transistors: MOS 场效应管模块
- GTO_s: GTO 可控硅模块
- IGBTs: IGBT 模块
- Operational Amplifier: 运算放大器模块
- Thyristor: 晶闸管模块

下面以二极管 Diode、IGBT 模块为例进行介绍。

3.1 Diode 模块特性

首先将 Diode 模块拖曳到工程绘图区窗口，再双击 Diode 模块，将弹出属性对话框，如图 3-1 和图 3-2 所示。图 3-1 显示二极管电气参数，在 Electrical Behavior 下拉列表框可以选择模型级别，共有 0、1、2、3 四种类型。图 3-2 显示二极管热模型参数，在 Thermal Behavior 下拉列表框可以选择热模型级别，共有 0、1、2 三种类型。下面介绍 Simplorer 中 Diode 模块特性，图 3-3 为二极管等效电路模型。

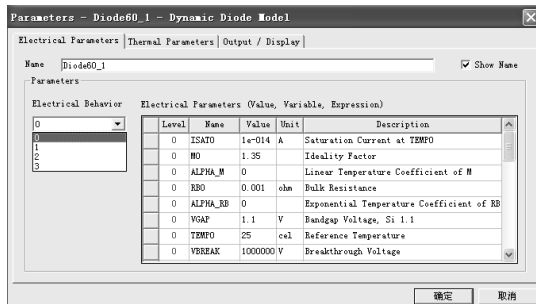


图 3-1 Diode 属性对话框—电气模型参数

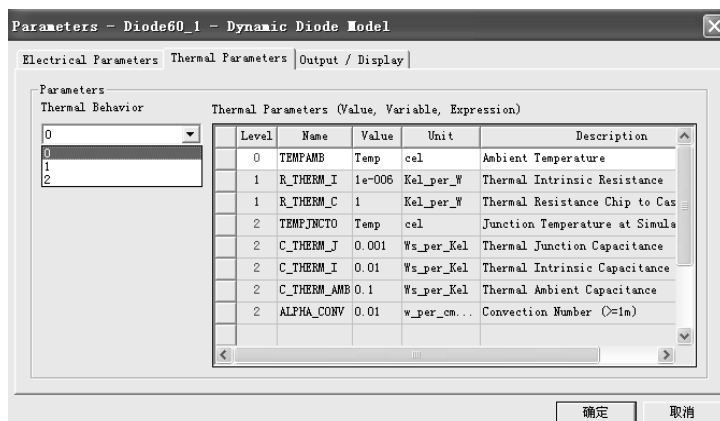


图 3-2 Diode 属性对话框—热模型参数

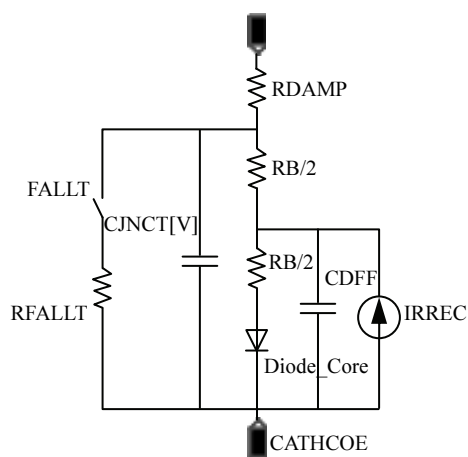


图 3-3 Diode 等效电路模型

3.1.1 电气模型特性

TYPE_DYN=0: 只考虑静态特性，下面是电流的表达式：

$$\begin{cases} I = IS \times (e^{\frac{V - I \times RB}{M \times V_T}} - 1) \\ V_T = \frac{k \times (Temp_{Jnct} + 273^\circ K)}{q} \end{cases}$$

式中， k 为玻耳兹曼常量 ($k=1.381e-23$)， q 为基本电荷量 ($q=1.602e-019$)。

TYPE_DYN=1: 除了静态特性外，还考虑了结电容、扩散电容的充电、放电效应，结电容、扩散电容的值如下面两个表达式：

$$C_{JNCT} = C_{0JNCT} \times \left\{ 1 + (BETA_{JNCT} - 1) \times [1 - e^{-\frac{(ALPHA_{JNCT} \times (V_{JNCT} - V_{SHIFT}) \times (1 - DELTA_{JNCT}))}{V_{DIFF} \times (BETA_{JNCT} - 1)}}] \right\}$$

$$C_{DIFF} = TAU \times \frac{d(I_{JNCT})}{d(V_{JNCT})} = TAU \times \frac{(I_{JNCT} + IS)}{M \times V_T}$$

TYPE_DYN=2/3: 进一步考虑了二极管电流的反向恢复特性，分成五个阶段，如图 3-4 所示。第一个阶段电流表达式为指数形式；第二个阶段电流表达式为正弦形式；第三个阶段电流表达式为余弦形式；TYPE_DYN=2 时，第四个阶段电流表达式为指数形式，TYPE_DYN=3 时，第四个阶段电流表达式为线性形式；第五个阶段电流表达式为二次函数形式。

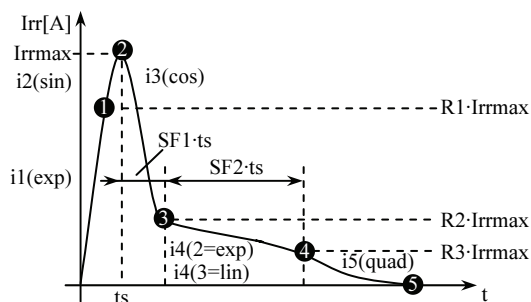


图 3-4 Diode 反向恢复特性

3.1.2 热模型特性

二极管热模型参数如图 3-5 所示，PEL 作为一个电流源，代表二极管实际流过的电流。

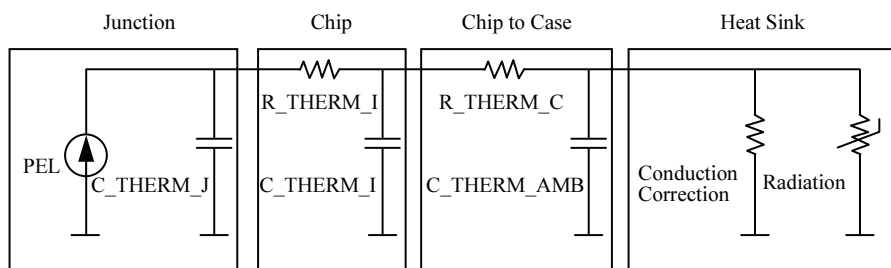


图 3-5 Diode 热网络模型

TYPE_THERM=0: 环境作为模型的实际温度值，根据这个温度值计算相应参数。

TYPE_THERM=1: 考虑内部损耗及热电阻对温度的影响，不过不考虑热电容值的变化。

TYPE_THERM=2: 考虑内部损耗及热电阻、热电容变化对温度的影响，是一个动态热模型。

3.2 IGBT 模块特性

IGBT 器件级模型共有 Advanced Dynamic IGBT Model、Average IGBT Model、Basic Dynamic IGBT Model 三种类型；每一种类型下面包含四个不同的 IGBT 模块，其中又分为 N、P 型。

3.2.1 Advanced Dynamic Model

Advanced Dynamic IGBT Model 共有 0、1、2、3、4 五种电气模型类型及 0、1、2 三种热模型类型，每一种模型类型都具有自身特定的参数，图 3-6 为 IGBT 等效电路模型。

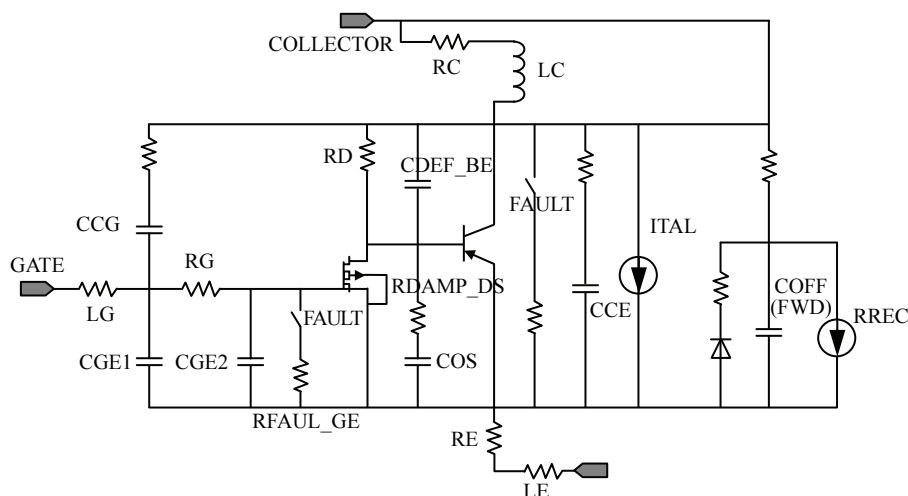


图 3-6 IGBT 等效电路模型

TYPE_DYN=0: 只考虑静态特性, 忽略了电容参数的变化及开关过程特性, 饱和电压、电流的表达式如下:

$$V_{sat} = A_{FET} \times (V_{GS} - V_P)^{M_{FET}}$$

$$I_{sat} = \frac{k}{2} \times (V_{GS} - V_P)^{N_{FET}}$$

线性区电流表达式为:

$$I_C = B_N \times I_{sat} \times (1 + KLM \times V_{DS}) \times (2 - \frac{V_{DS}}{V_{sat}}) \times \frac{V_{DS}}{V_{sat}}$$

系数 k 、电压 V_P 、电流增益 B_N 都是随温度变化的系数, 可以根据实际温度值进行修正。

TYPE_DYN=1: 除了静态特性外, 还考虑了结电容、扩散电容的充电、放电效应, 结电容、扩散电容的值如下面两个表达式:

$$C_{JNCT} = C_0 \times (1 + (BETA - 1) \times (1 - e^{\frac{V_{JNCT} \times ALPHA \times (1 - DELTA)}{(BETA - 1) \times V_{DIFF}}}))$$

$$C_{DIFF} = TAU \times \frac{i(t) + ISAT}{M \times V_T}$$

TYPE_DYN=2: 通过附加一个等效的电流源来模拟拖尾电流。

TYPE_DYN=3: 考虑温度及集电极电流对拖尾电流的影响。

TYPE_DYN=4: 除了考虑上面的影响外, 还考虑了集射极电压对拖尾电流的影响。

当 IGBT 模型包含二极管并联时, 其二极管特性如前面分析所示, 可以考虑不同等级二极管模型及电流的反向恢复特性。图 3-7 为 N 型二极管并联 IGBT 模型关断过程电压、电流波形, 图 3-8 为 N 型二极管并联 IGBT 模型导通过程电压、电流波形。

3.2.2 Average Model

Average Model 主要基于电热耦合模型计算导通及开关损耗, 电气及热模型中相关的参数是基于器件 Datasheet 技术文档进行提取。图 3-9 是 Average Model 等效电路模型, 包含双极晶体管、MOS 场效应管和二极管, 图 3-10 为 Average Model 等效热网络模型。

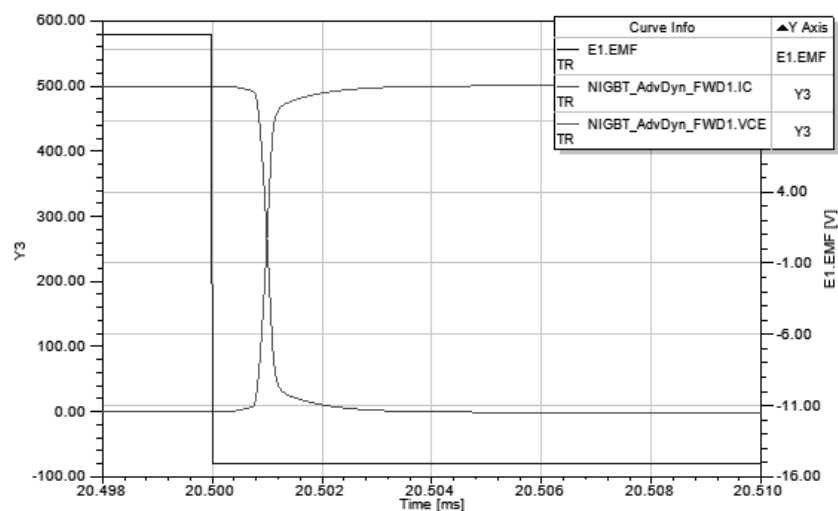


图 3-7 关断波形

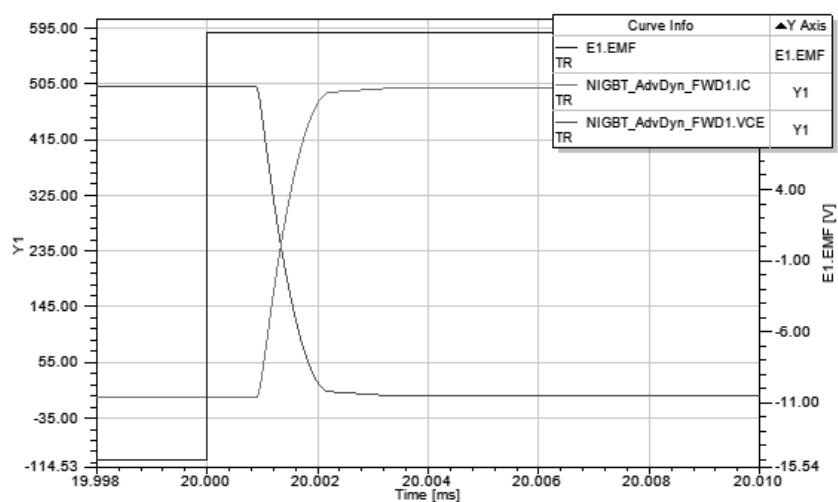


图 3-8 导通波形

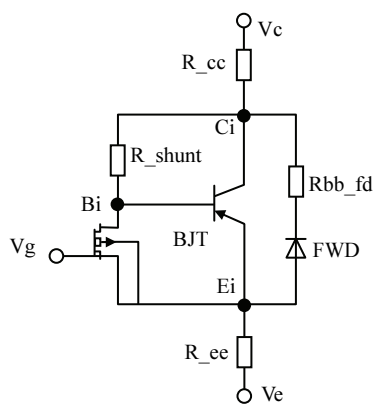


图 3-9 Average Model 等效电路模型

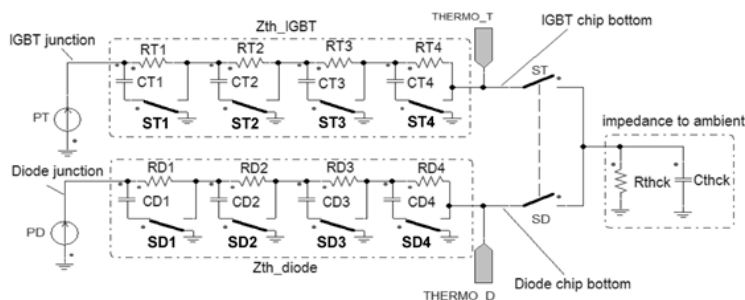


图 3-10 Average Model 等效热网络模型

3.2.3 Basic Dynamic Model

Basic Dynamic Model 等效电路模型与 Advanced Dynamic Model 相同，包含五种电气模型类型，但只包括额定参数及相应的部分参数；热网络模型与 Average Model 相同。

3.3 IGBT 动态模型封装

Simplorer 除了提供器件级 (Device Level) 模型外，还提供了创建 IGBT 动态模型窗口，根据器件厂商提供的 Datasheet PDF 文件中的相应参数及特性曲线，自己进行模型封装，这样得到的 IGBT 动态模型导通、关断特性更加准确。目前 Simplorer 8.0 或 Simplorer 9.0 提供了 Average Model、Basic Dynamic Model IGBT 模型自行封装窗口，Simplorer 10.0 添加了 Advanced Dynamic IGBT、Power-MOSFET 模型自行封装窗口，对于其他器件没有提供，可能会在以后的版本中不断增加。

Simplorer 8.0 或 Simplorer 9.0 在 IGBT 模型创建中，有 Average IGBT 和 Basic Dynamic IGBT 两种类型，其中 Average IGBT 考虑器件的静态特性及平均开关损耗，Basic Dynamic IGBT 考虑器件的动态特性。这两种模型创建的具体步骤如图 3-11 和图 3-12 所示，其大体步骤相同，只是倒数第二、三步不相同。

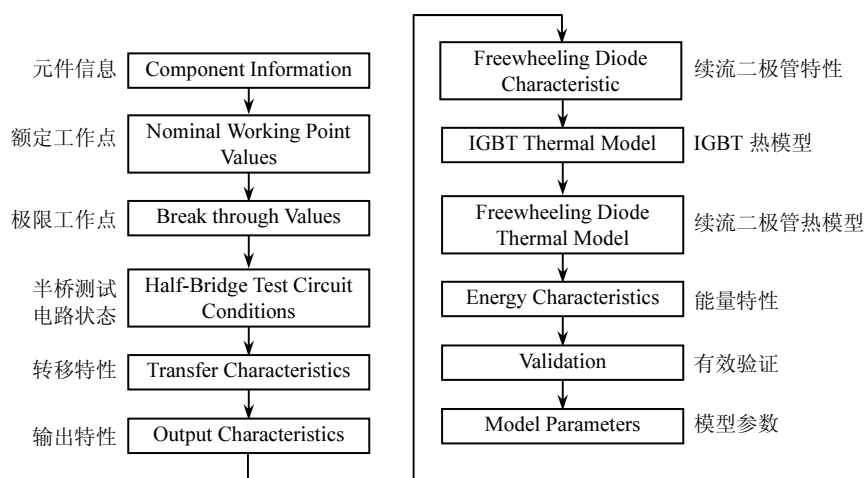


图 3-11 Average IGBT 创建步骤

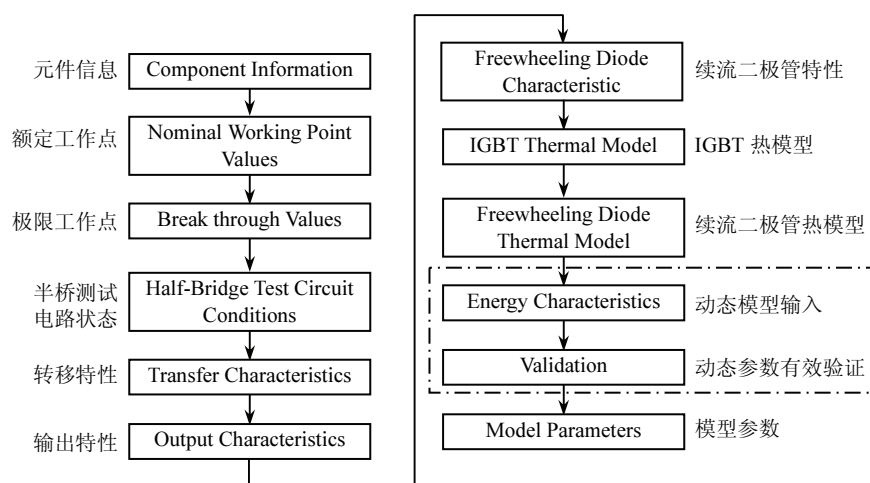


图 3-12 Basic Dynamic IGBT 创建步骤

3.3.1 Basic Dynamic 模型封装流程

下面基于 Simplorer 8.0 具体介绍创建 Basic Dynamic IGBT 模型的每一步操作流程。

首先点击主菜单 Simplorer Circuit→Characterize Device→Semiconductors... (如图 3-13 所示), 弹出创建 IGBT 模型对话框(如图 3-14 所示), 如要新建 IGBT 动态模型, 点击 New device 单选按钮, Device type 下拉列表框含有 Average IGBT 和 Basic Dynamic IGBT 两种器件类型, 可以任选一种; 如果是对已经建立好的 IGBT 动态模型进行修改或编辑, 点击 Continue device characterization 单选按钮, 找到模型存放的路径; 最终点击 OK 按钮进入模型创建的第一步 (Component Information[1/12]), 设置 IGBT 模型名称及相应信息 (如图 3-15 所示)。

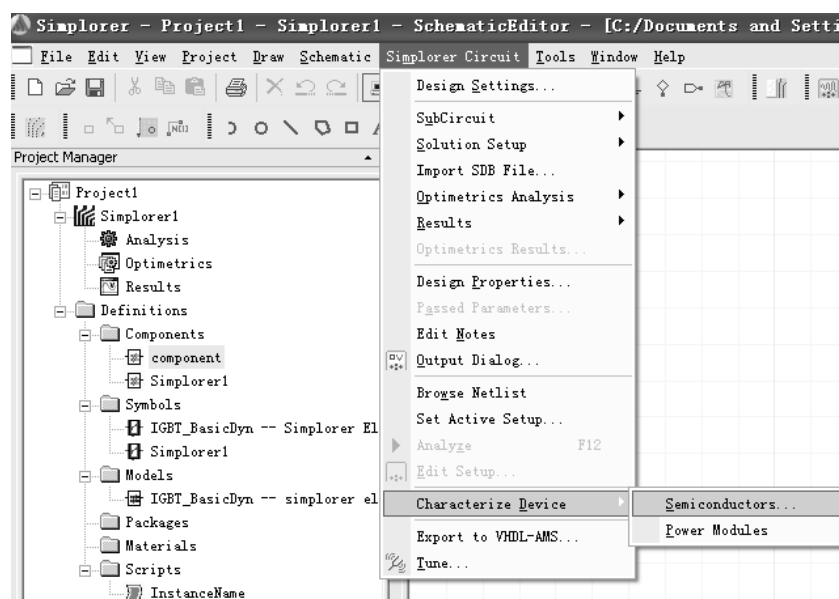


图 3-13 Simplorer Circuit 菜单



图 3-14 模型类型选择



图 3-15 模型创建第一步：信息说明

点击“下一步”按钮进入模型创建的第二步（如图 3-16 所示）：IGBT 模型额定工作点设置(Nominal Working Point Value[2/12])。主要设置额定电压 V_{ce_nom} (Nominal Collector Emitter Blocking Voltage)、额定电流 I_{c_nom} (Nominal Collector Current)、额定参考温度 (Nominal Reference Temperature)、集射极饱和电压 (Collector-Emitter Saturation Voltage under Nominal)、门极驱动电压 (On-Switch or Off-Switch Gate-Emitter Drive Voltage)。这些额定值在器件 Datasheet PDF 文档中都可以找到。



图 3-16 模型创建第二步：额定工作点设置

点击“下一步”按钮进入模型创建的第三步（如图 3-17 所示）：IGBT 模型被击穿时相应参数设置(Breakthrough Value[3/12])。主要设置击穿电压 V_{ce_br} (Breakthrough Collector Emitter Voltage)、击穿电流 I_{c_br} (Breakthrough Collector Current)、击穿时温度 T_{j_br} (Breakthrough Junction Temperature)、门射极击穿电压 V_{ge_br} (Breakthrough Gate Emitter Voltage)、击穿时集射极电阻 R_{ce_br} (Collector-Emitter Resistance After Fault)、击穿时门射极电阻 R_{ge_br} (Gate-Emitter Resistance After Fault)。图中各参数的值为系统默认值，而击穿电压、击穿电流一般设置为最大电压 V_{ce_max} 、最大电流 I_{c_max} 的两倍即可；击穿时温度一般要大于工作点的最高温度；门射极击穿电压一般要大于额定工作点的门射极电压；击穿时集射极电阻、击穿时门射极电阻设置为额定值，除非提供厂商有特别说明。当勾选 Disable Breakthrough Model 复选框时，模型将不考虑击穿情况。



图 3-17 模型创建第三步：模型击穿边界说明

点击“下一步”按钮进入模型创建的第四步（如图 3-18 所示）：IGBT 模型半桥测试电路参数设置 (Half-Bridge Test Circuit Condition[4/12])。主要设置门极连接电阻 R_{gg} (Gate Connector Resistance)、极射极间连接电阻 (Collector-Emitter Connectors)、门极连接电感 (Gate Connector Inductance)、所有杂散电感 (Total Stray Inductance)、级联时模块之间的杂散电感 (Module Stray Inductance)、开关导通电阻 (Switching-on Gate Resistance)、开关关断电阻 (Switching-off Gate Resistance)、外部连接电容 (External Driver Gate Capacity)。图中各参数值为系统默认值，实际设置时，门极连接电阻一般为开关导通电阻的 10%左右；极射极间连接电阻一般采用系统默认设置；门极连接电感同样采用系统默认设置；所有杂散电感值、开关导通电阻、开关关断电阻在 Datasheet PDF 文档里面有；外部连接电容值如果在 Datasheet PDF 文档里面没有，就采用系统默认值。当勾选 Use default value 复选框时，上面的参数设置框将被屏蔽，不能输入数值，全部采用 Simplorer 系统的默认值。

点击“下一步”按钮进入模型创建的第五步（见图 3-19）：IGBT 转移特性设置 (Transfer Characteristic $I_c=f(V_{ge})$ [5/12])。界面主要由五部分组成：边界条件设置框 (Boundary Conditions)、曲线拟合数值范围设置框 (Fitting Ranges)、曲线拟合特性序列框 (Fitting Characteristic Order)、转移特性曲线数值输入框 (Characteristic Data)、曲线拟合设置框 (Fitting)。

(1) 边界条件设置框用来设置转移特性曲线所对应的温度和集射极电压。

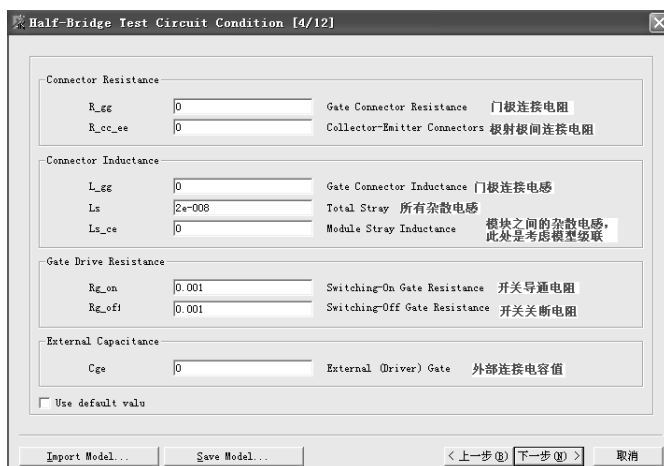


图 3-18 模型创建第四步：半桥测试状况（导通电阻、杂散电感、电容值）



图 3-19 模型创建第五步：IGBT 转移特性曲线输入

(2) 曲线拟合数值范围设置框用来设置转移特性曲线中集电极电流的最大值、最小值，当转移特性曲线输入后会自动显示这两个值。

(3) 曲线拟合特性序列框用来显示不同温度条件下对应的转移特性曲线，通常为 125 度、25 度。

(4) 转移特性曲线数值输入框是根据 Datasheet PDF 文档中的特性曲线，输入曲线对应的数值。

(5) 曲线拟合设置框进行曲线拟合及拟合后的结果显示。

在边界条件设置框中设置温度为 125、集射极电压为 10。下面介绍 Characteristic Data（转移特性曲线数值输入）框中每个按钮的含义，如图 3-20 所示。点击打开数据输入对话框按钮，将弹出 Datasets 对话框（如图 3-21 所示）；在这个对话框中有添加、编辑、移除、复制、导入、导出和显示等按钮。点击 Add 按钮，将弹出 Add Dataset 对话框（如图 3-22 所示），在这个对话框中可以手工输入数据，也可以直接点击 Import Dataset...按钮，导入已经存在的数据曲线（如图 3-23 所示）。数据输入后也可以点击 Export Dataset...按钮，导出数据曲线，如图 3-24 所示。

	Open an existing characteristic data file (.mdx file) 打开已经建好的转移特性曲线文件（文件后缀是 .mdx）
	Open the Dataset Manager dialog to allow manual data point entry or data entry via the sheetscan tool. 打开数据输入对话框，可以手工输入也可以直接导入数据曲线
	Save the characteristic data to a file (.mdx file) 保存建好的数据曲线（文件类型是 .mdx）
	Plot the selected characteristic curve. 绘制所选择的特性曲线
	Create new row of data for the selected characteristic. 在所选择的特性曲线中添加行
	Delete the selected row of data. 在所选择的特性曲线中删除行
	Delete all the data for the selected characteristic. 在所选择的特性曲线中删除所有的行
	Move the selected row of data upward. 将所选择的某一行数据上移
	Move the selected row of data downward. 将所选择的某一行数据下移

图 3-20 Characteristic Data 框中各按钮的含义

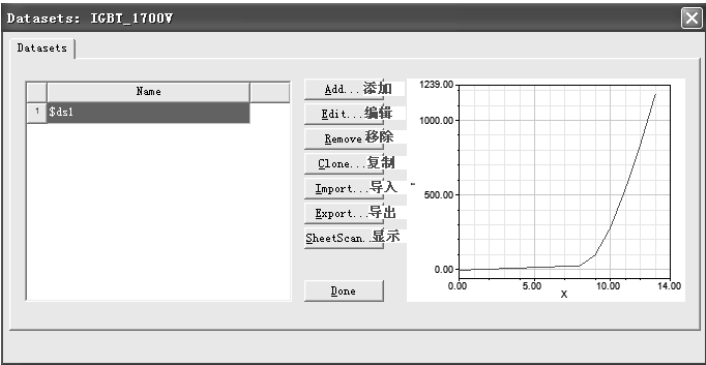


图 3-21 Datasets 对话框

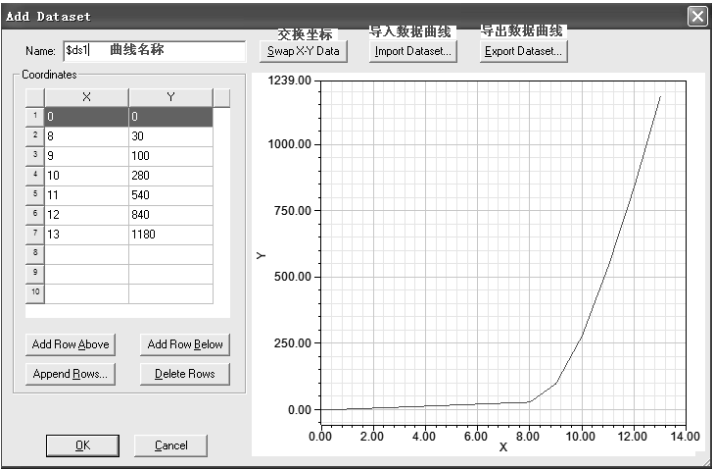


图 3-22 添加曲线数据

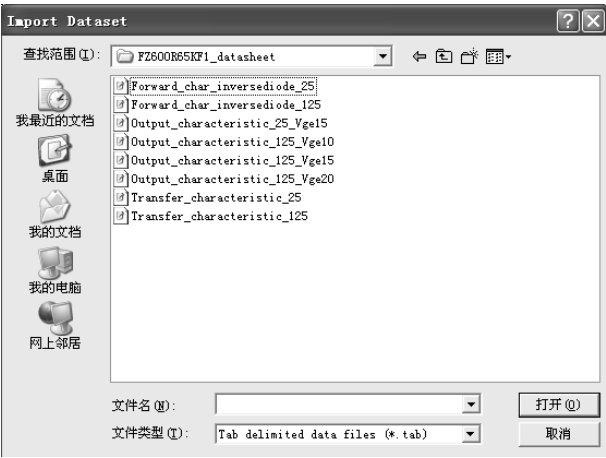


图 3-23 导入曲线数据

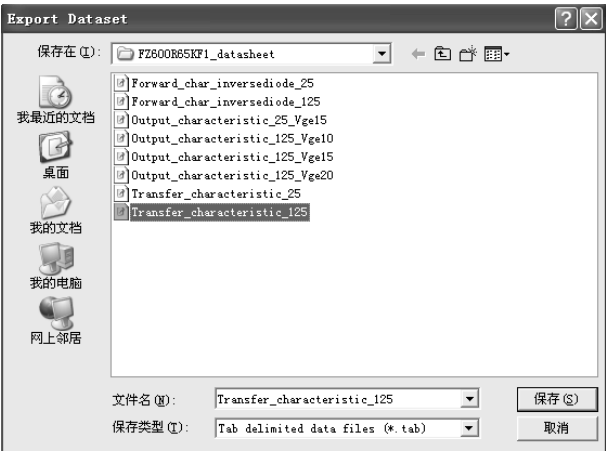


图 3-24 导出曲线数据

在 IGBT 转移特性曲线输入设置界面的右上角（如图 3-19 所示）有三个按钮（如图 3-25 所示），其含义如图 3-26 所示。



图 3-25 添加、删除按钮

	Plot the selected characteristic curve. 绘制所选择的特性曲线
	Add a new characteristic tab 增加新的特性曲线
	Delete the currently selected characteristic tab and all associated data 删除所选择的特性曲线

图 3-26 添加、删除按钮说明

在 IGBT 的 Datasheet PDF 文件中，转移特性曲线一般有温度分别为 125、25 度的两条曲线。上面只输入了温度为 125 度时的特性曲线，点击图 3-25 中的 Add 按钮，在边界条件设置框中将温度设置为 25、集射极电压设置为 10，特性曲线数据的输入步骤如上面所示。两条特性曲线数据输入完成后，在 Fitting Characteristic Order（曲线拟合特性序列）框中的 Nominal 栏中会自动显示出 Ch.01-125.0 度（此为额定温度运行点，必须进行曲线拟合，125 度作为额定温度是在图 3-16 中设置的）。点击 Different 栏的下拉按钮，有 Ch.02-25.0、Not Used 两种选择。当不考虑温度为 25 度的转移特性曲线时，选择 Not Used，这样将不会对曲线 Ch.02-25.0 进行曲线拟合；选择 Ch.02-25.0，将会同时对 Ch.01-125.0、Ch.02-25.0 两条曲线进行拟合，这样对不同温度下的转移特性曲线将可以通过线性插值得到。

曲线拟合设置框（Fitting）中有四个按钮，分别是 Start Fitting、Show Log、Show Result 和 Validate。Start Fitting 按钮为执行曲线拟合；Show Log 按钮为显示拟合曲线参数信息；Show Result 按钮为绘制输入数据及拟合曲线；Validate 按钮为曲线拟合有效性验证。

点击 Start Fitting 按钮，将弹出图 3-27 和图 3-28。点击 Show Log 按钮，将弹出图 3-29，从图中可以看出 Fitting Successful! 的提示信息，说明曲线拟合成功。

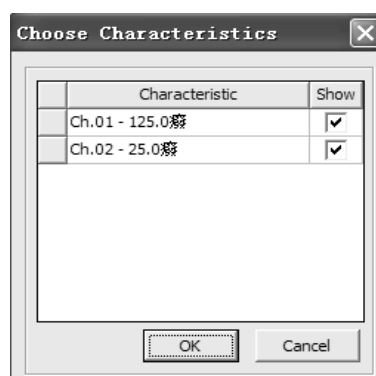


图 3-27 选择转移特性曲线数据

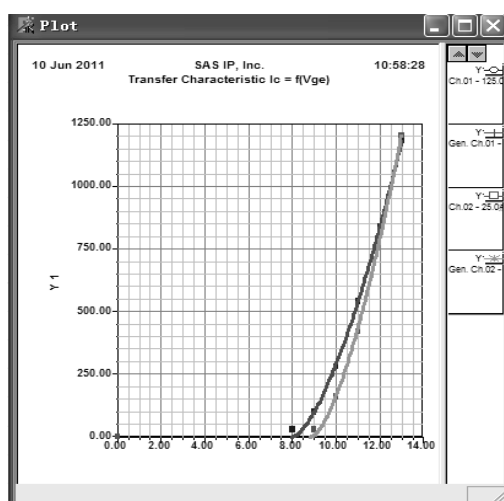


图 3-28 转移特性曲线数据拟合

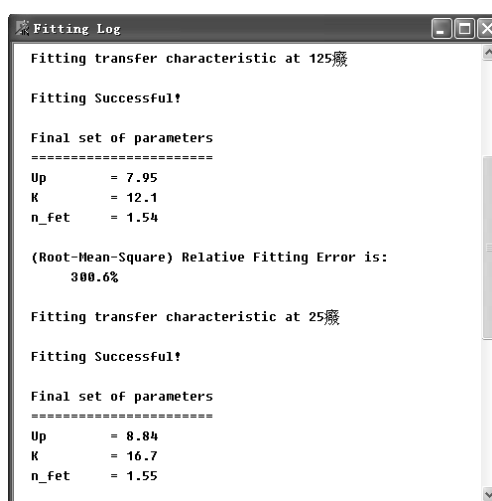


图 3-29 曲线数据拟合信息

设置完转移特性曲线后, 点击“下一步”按钮进入模型创建的第六步(如图 3-30 所示): IGBT 输出特性设置(Output Characteristic $I_c=f(V_{ce})$ [6/12])。这个界面与转移特性曲线输入界面大致相同, 在 Fitting Characteristic Order 框中有 Full Saturated Branch (T_{nom})、Semi Saturated Branch (T_{nom})、Full Saturated Branch (T_{diff})、Semi Saturated Branch (T_{diff}) 四个下拉列表框。Full Saturated Branch (T_{nom}) 栏对应为额定温度及充分饱和门射极电压下的输出特性曲线; Semi Saturated Branch (T_{nom}) 栏对应为额定温度及不饱和门射极电压下的输出特性曲线; Full Saturated Branch (T_{diff}) 栏对应为非额定温度及充分饱和门射极电压下的输出特性曲线; Semi Saturated Branch (T_{diff}) 栏对应为非额定温度及不饱和门射极电压下的输出特性曲线。

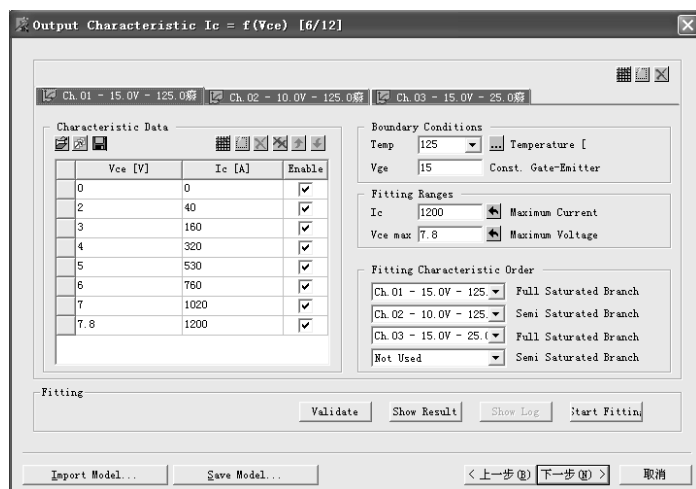


图 3-30 模型创建第六步: IGBT 输出特性曲线输入

根据 Datasheet PDF 里面的输出特性曲线, 在数据输入框中分别输入不同温度、不同门射极电压 V_{ge} 条件下的输出特性曲线, 共输入 Ch.01-15.0V-125.0、Ch.02-10.0V-125.0、Ch.03-15.0V-25.0 三条曲线, 10.0V-25.0 非额定温度及不饱和门射极电压下的输出特性曲线在 Datasheet PDF 中没有给出。

曲线拟合设置框(Fitting)中同样有四个按钮, 分别是 Start Fitting、Show Log、Show Result 和 Validate。Start Fitting 按钮为执行曲线拟合; Show Log 按钮为显示拟合曲线参数信息; Show Result 按钮为绘制输入数据及拟合曲线; Validate 按钮为曲线拟合有效性验证。先点击 Start Fitting 按钮进行数据曲线拟合, 然后点击 Show Log 按钮, 将弹出拟合曲线参数信息, 再点击 Validate 按钮进行有效性验证。

点击“下一步”按钮进入模型创建的第七步(如图 3-31 所示): 续流二极管特性曲线设置(Freewheeling Diode Characteristic $I_f=f(V_f)$ [7/12])。这个界面与转移特性曲线输入界面大致相同。特性曲线数据输入后, 同样先点击 Start Fitting 按钮进行数据曲线拟合, 然后点击 Show Log 按钮, 将弹出拟合曲线参数信息, 再点击 Validate 按钮进行有效性验证。如果勾选 Disable Diode 复选框将不会考虑续流二极管特性的影响。

热效应主要包括两部分: IGBT 热效应和 Freewheeling Diode 热效应。设置完续流二极管特性曲线后, 点击“下一步”按钮进入模型创建的第八步(如图 3-32 所示): IGBT 热效应设置(IGBT Thermal Model[8/12])。IGBT 热效应设置有瞬态热阻抗(Transient Thermal Impedance)

和分数参数模型 (Fraction Model) 两种方式。其中分数参数模型根据 RC 元素结构的不同又分为 Continued Fraction Coefficients (并联结构) 和 Partial Fraction Coefficients (T 型结构) 两种。在 Fitting mode 框中, 当选中 Transient Thermal Impedance 方式时, 瞬态热阻抗 (Transient Thermal Impedance) 框将被激活, 可以根据 Datasheet PDF 里面的曲线数据输入; 当选中 Fraction Model 方式时, Continued/Partial Fraction Coefficients 框将被激活, 可以输入 Datasheet PDF 里面的 R_i 、 τ_i 数据。散热器 (Heatsink) 框中包含热电阻 (Thermal Resistance) 和热电容 (Thermal Capacitance) 两个参数输入栏。这两个参数可由散热器生产厂商提供, 如果没有提供可以采用系统默认值。

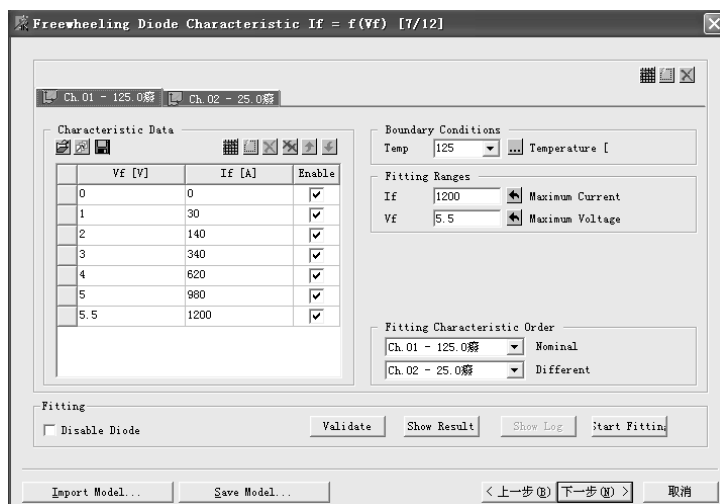


图 3-31 模型创建第七步: 续流二极管特性曲线输入

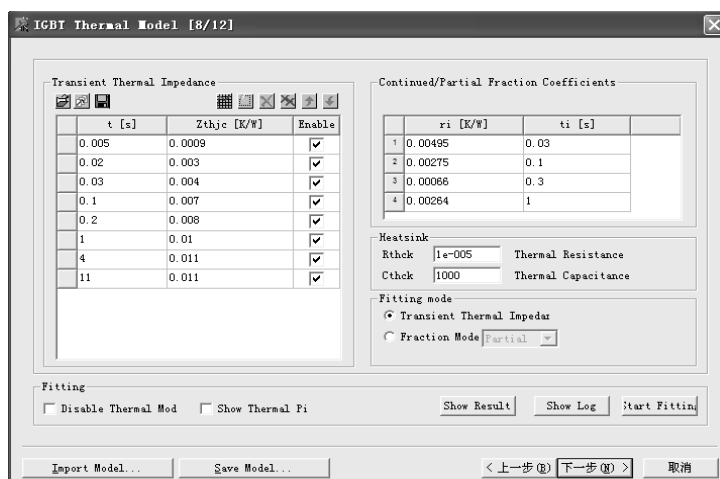


图 3-32 模型创建第八步: IGBT 热效应参数输入

数据输入后, 先点击 Start Fitting 按钮进行数据曲线拟合, 然后点击 Show Log 按钮, 将弹出拟合曲线参数信息。如果勾选 Disable Thermal Mode 复选框, 将不会考虑 IGBT 热效应和后面需要设置的 Freewheeling Diode 热效应影响。

点击“下一步”按钮进入模型创建的第九步（如图 3-33 所示）：续流二极管热效应设置（Freewheeling Diode Thermal Model[9/12]）。操作流程及选项与 IGBT 热效应设置相类似。如果勾选 Disable Thermal Mode 复选框将不会考虑 Freewheeling Diode 热效应影响。

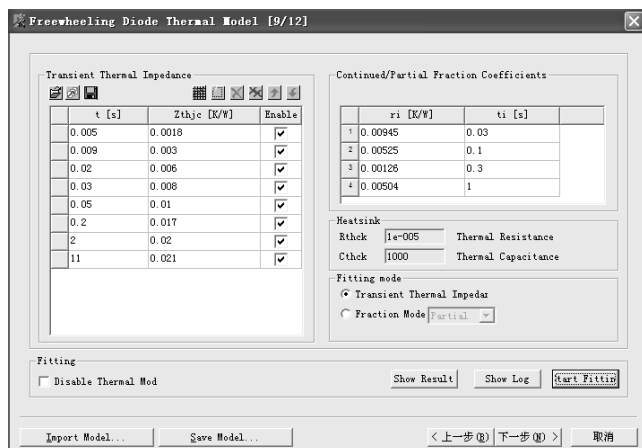


图 3-33 模型创建第九步：Diode 热效应参数输入

点击“下一步”按钮进入模型创建的第十步（如图 3-34 所示）：动态模型输入设置（Dynamic Model Input [10/12]）。这个界面将会弹出 6 种不同工况下器件开通、关断损耗，开通、关断延时栏，可以根据 Datasheet 或厂商提供的数据，在 Enable 栏下有选择性地勾选所知道的工况，最后点击 Extraction 按钮进行参数提取。如果不点击右下角的 Extraction 按钮进行参数提取，会弹出图 3-35 所示的提示信息。如果前面的参数设置不太正确，其 Extraction 参数抽取时间很长，有时还会显示错误信息，如 Error-K is 3.80e-10 and therefore out of range 1.0e-6。

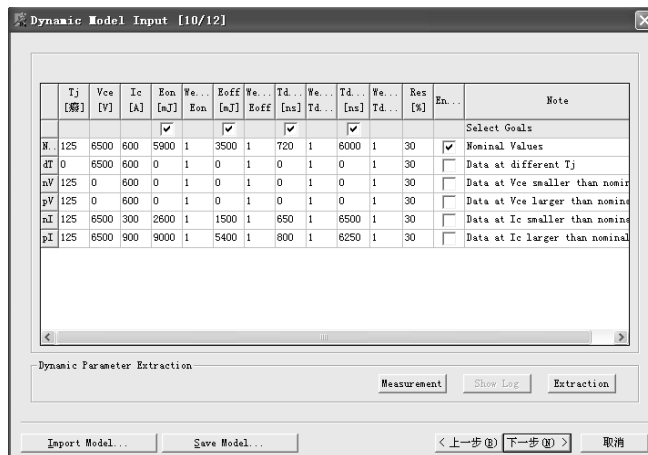


图 3-34 模型创建第十步：动态模型输入

点击“下一步”按钮进入模型创建的第十一步（如图 3-36 所示）：动态参数有效性验证（Dynamic Parameter Validation [11/12]）。在 Enable 栏下有选择性地勾选前面设置好的工况进行动态参数有效性验证。图 3-36 只选择了额定工作点，点击 Validation 按钮后将会在右边的红色框中显示前面设置好的器件开通、关断损耗，开通、关断延时数据，说明动态参数的有效性。

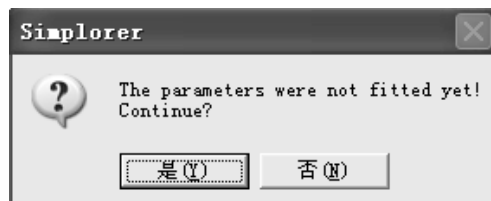


图 3-35 不进行参数提取时显示的信息

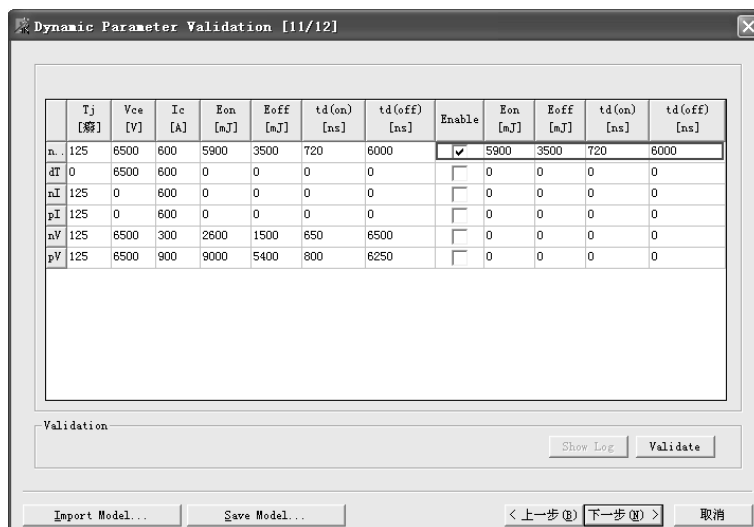


图 3-36 模型创建第十一步：动态参数有效性验证

点击“下一步”按钮进入模型创建的第十二步（如图 3-37 所示）：IGBT 创建模型参数显示（Model Parameters [12/12]）。点击 Create SML 按钮将创建 IGBT 模型 SML 文件并保存到相应路径。最后点击“完成”按钮，整个模型创建完毕。

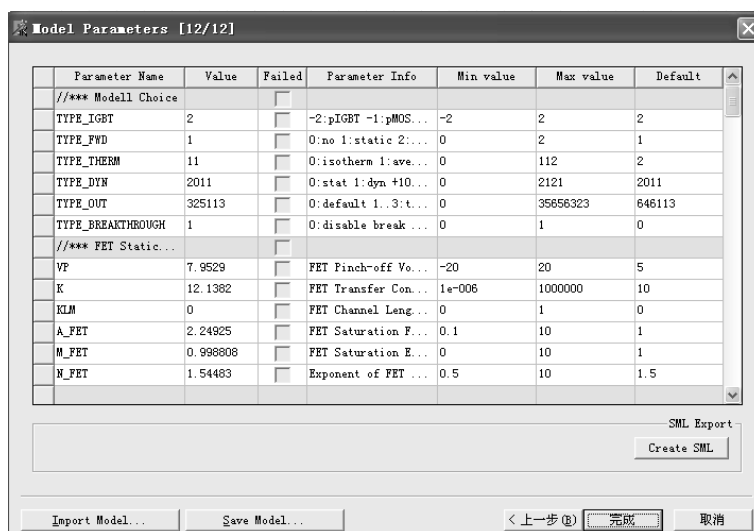


图 3-37 模型创建第十二步：IGBT 模型所有参数显示

3.3.2 IGBT 动态模型仿真实例

Simplorer 9.0 创建 IGBT 动态模型步骤与 Simplorer 8.0 几乎完全相同，只是某一两个操作界面有些参数不同。下面以一款 BSM400GA170DLC 型号 IGBT 基于 Simplorer 9.0 创建过程作为仿真实例。首先，从网上下载 BSM400GA170DLC 的 PDF 说明文档，模型创建具体步骤如下。

1. Basic Dynamic IGBT 创建

在 Device type 下拉列表框中选择 Basic Dynamic IGBT，然后点击 OK 按钮（如图 3-38 所示）。在 Component Information[1/12]对话框输入相应的模型信息（如图 3-39 所示），点击  按钮将出现 Manufacturer Data 对话框，显示 IGBT 导通或关断起始时间、终止时间取值标准，通常采用默认值。

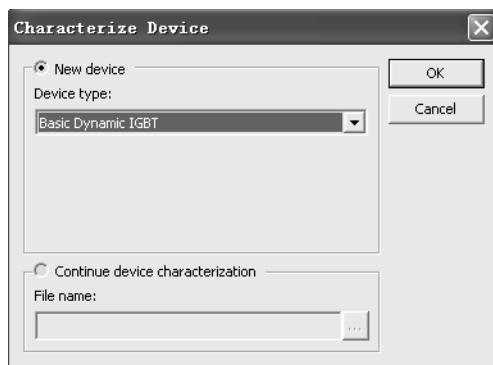


图 3-38 Characterize Device 对话框

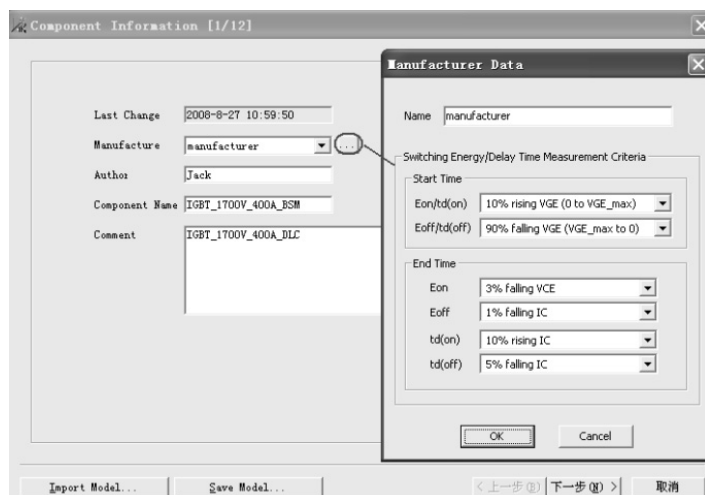


图 3-39 Component Information[1/12]对话框

点击“下一步”按钮，进入 Nominal Working Point Values[2/12]对话框，输入额定电压 900V、额定电流 400A、额定参考温度 125 度、门极驱动电压 $\pm 15\text{V}$ ，如图 3-40 所示。对应的值在 PDF 说明文档第 2 页（如图 3-41 所示）。

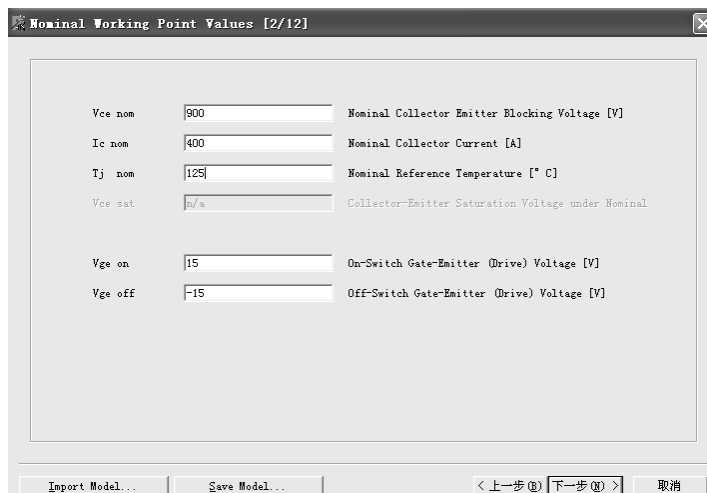


图 3-40 Nominal Working Point Values[2/12]对话框

Charakteristische Werte / Characteristic values

Transistor / Transistor

Einschaltverzögerungszeit (ind. Last)
turn on delay time (inductive load)

$I_C = 400A$, $V_{CE} = 900V$
 $V_{GE} = \pm 15V$, $R_G = 3,9\Omega$, $T_{ij} = 25^\circ C$
 $V_{GE} = \pm 15V$, $R_G = 3,9\Omega$, $T_{ij} = 125^\circ C$

图 3-41 说明文档

点击“下一步”按钮，进入 Breakthrough Values[3/12]对话框，集射极击穿电压设置为 6800V，击穿电流设置为 1600A，击穿温度设置为 200 度，门射极击穿电压设置为 60V，两个电阻采用默认值，如图 3-42 所示。

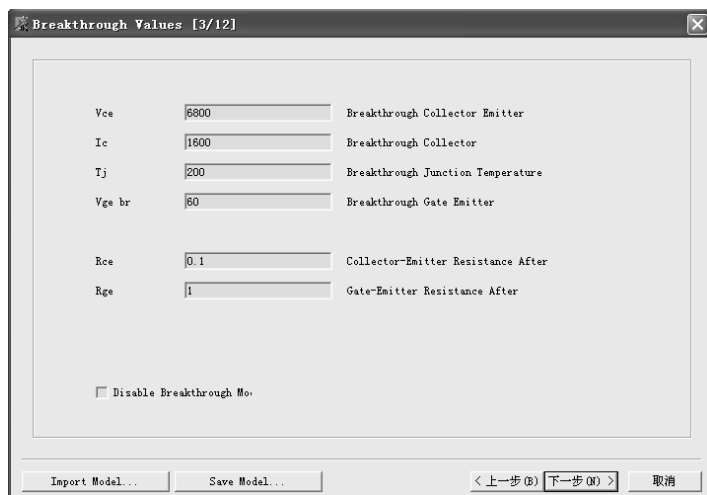


图 3-42 Breakthrough Values[3/12]对话框

点击“下一步”按钮，进入 Half-Bridge Test Circuit Condition[4/12]对话框，在门极导通电阻 R_{g_on} 、门极关断电阻 R_{g_off} 框中分别输入 3.9Ω，如图 3-43 所示。对应的值在 PDF 说明文档第 6 页（如图 3-44 所示），其余值采用默认状态。

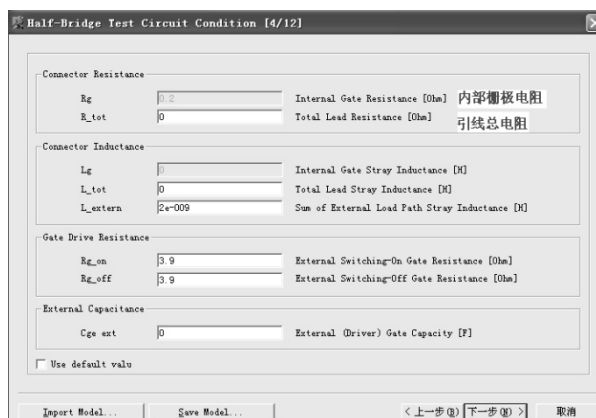


图 3-43 Half-Bridge Test Circuit Condition[4/12]对话框

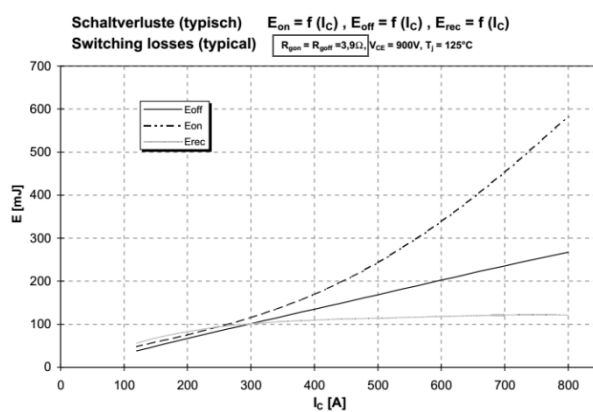
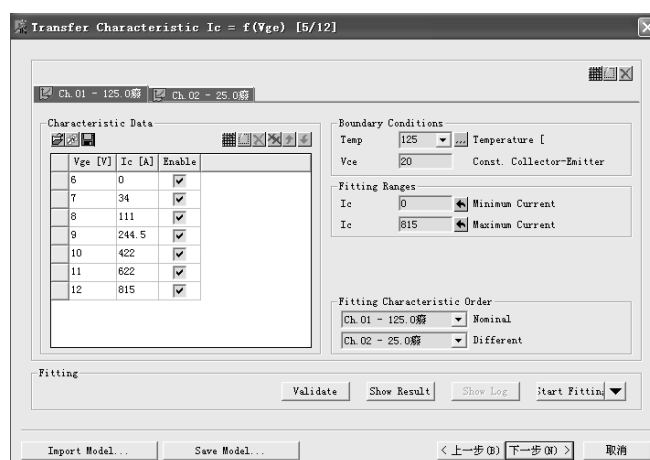


图 3-44 说明文档

点击“下一步”按钮，进入 Transfer Characteristic $I_c=f(V_{ge})$ [5/12]对话框，输入 125 度及 25 度条件下对应的转移特性曲线，如图 3-45 和图 3-46 所示。对应的曲线在 PDF 说明文档第 5 页（如图 3-47 所示）。

图 3-45 Transfer Characteristic $I_c=f(V_{ge})$ [5/12]对话框（125 度条件下）

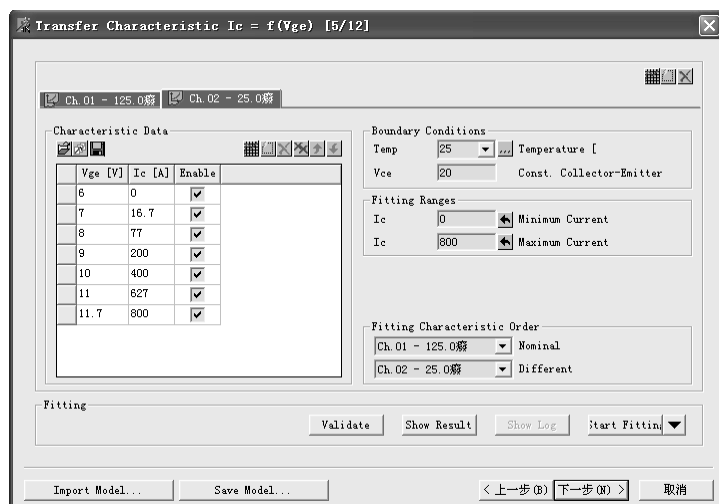


图 3-46 Transfer Characteristic $I_c = f(V_{ge})$ [5/12]对话框 (25 度条件下)

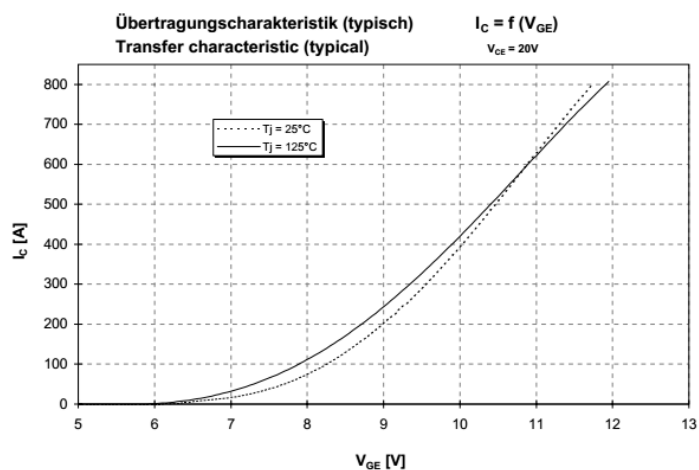


图 3-47 说明文档

参数输入完后, 点击 Start Fitting 按钮, 进行转移特性曲线拟合, 拟合完成后将弹出图 3-48 和图 3-49 所示的对话框。



图 3-48 拟合完成

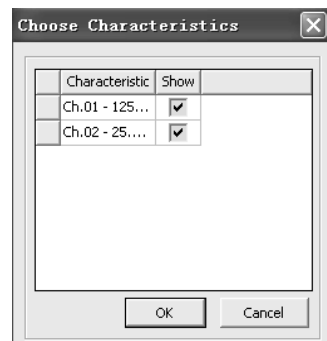


图 3-49 选择拟合完的特性曲线

点击 Show Log 按钮, 将弹出图 3-50 所示的文件, 从里面的数据可以看出拟合的结果是正确的。

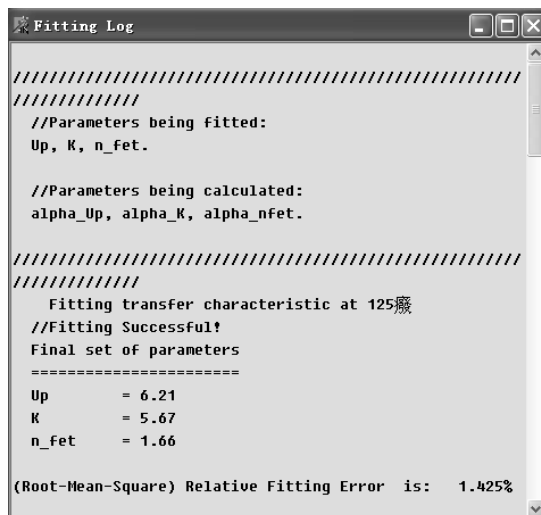


图 3-50 拟合日志

点击 Show Result 按钮, 将弹出 IGBT 转移特性曲线拟合结果, 如图 3-51 所示, 也可以从中看出拟合结果是正确的。

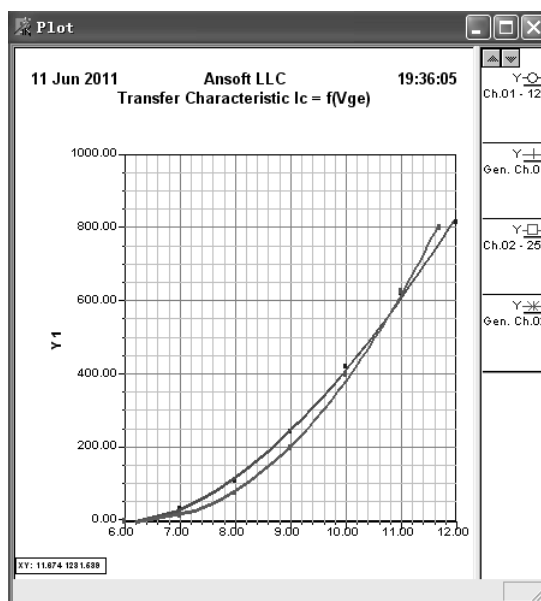


图 3-51 IGBT 转移特性曲线拟合结果

点击“下一步”按钮, 进入 Output Characteristic $I_c=f(V_{ce})$ [6/12]对话框, 分别输入 $Temp=125/V_{ge}=15V$ 、 $Temp=25/V_{ge}=15V$ 及 $Temp=125/V_{ge}=11V$ 条件下对应的输出特性曲线, 分别如图 3-52 至图 3-54 所示。对应的曲线在 PDF 说明文档第 4 页(如图 3-55 和图 3-56 所示)。其实也可以多输入几条输出特性曲线, 后面的拟合过程将更加接近实际情况。

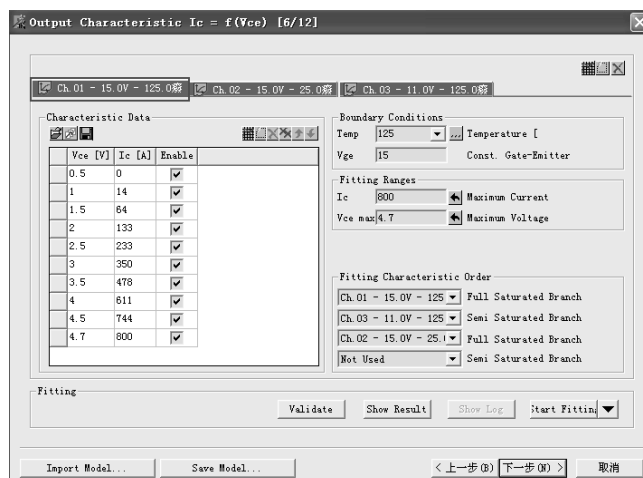


图 3-52 Output Characteristic $I_c=f(V_{ce})$ [6/12]对话框 (Temp=125/Vge=15V)

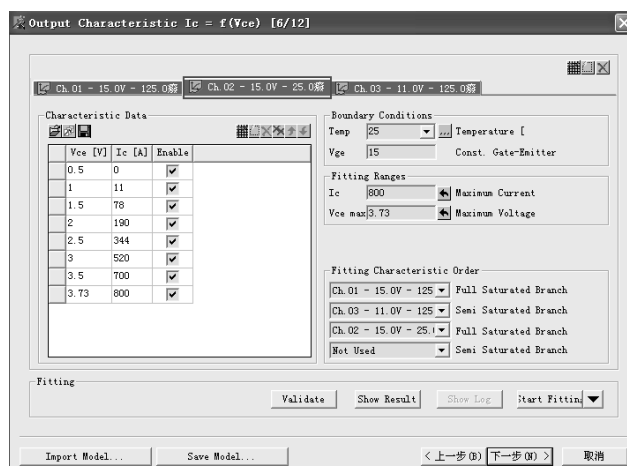


图 3-53 Output Characteristic $I_c=f(V_{ce})$ [6/12]对话框 (Temp=25/Vge=15V)

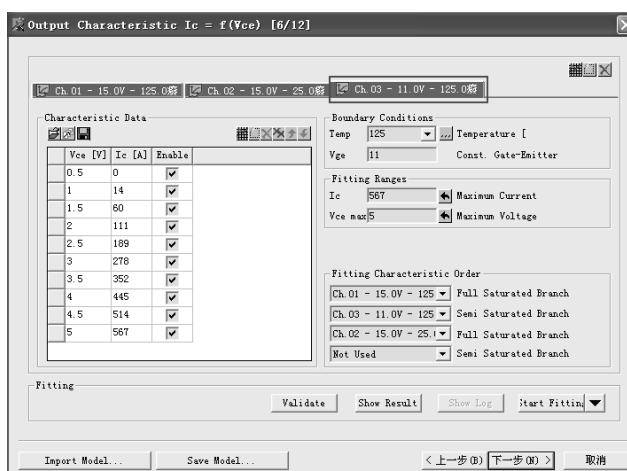


图 3-54 Output Characteristic $I_c=f(V_{ce})$ [6/12]对话框 (Temp=125/Vge=11V)

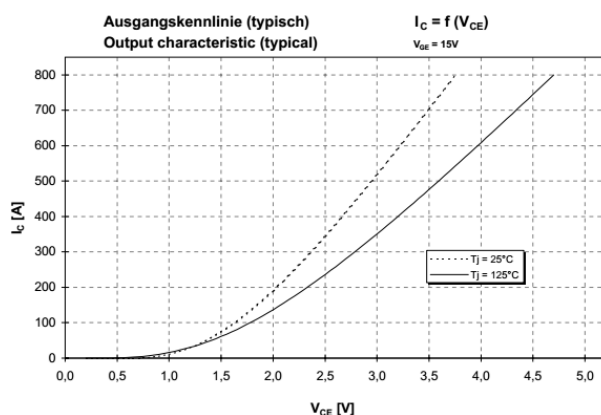


图 3-55 说明文档

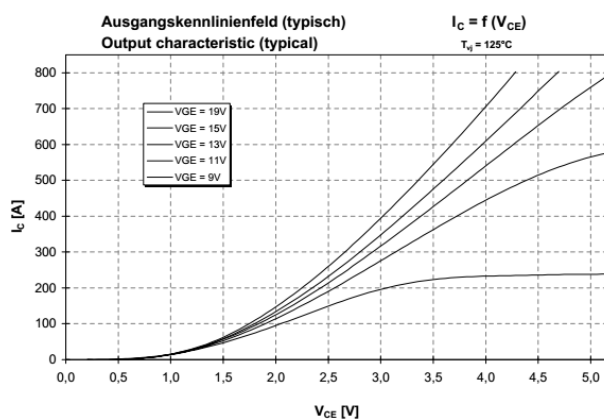


图 3-56 说明文档

先点击 Start Fitting 按钮再点击 Show Result 按钮，将得到 IGBT 输出特性曲线拟合结果，如图 3-57 和图 3-58 所示。

```

Fitting Log

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
// Fitting output characteristic at 125°C
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//Fitting Successful!
Final set of parameters
=====
n_bjt      = 9.89
ln_Is      = -2.76
n_fet      = 1.28
a_fet      = 0.527

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

(Root-Mean-Square)Relative fitting error for full-
saturated branch is: 31.71%
  
```

图 3-57 拟合日志

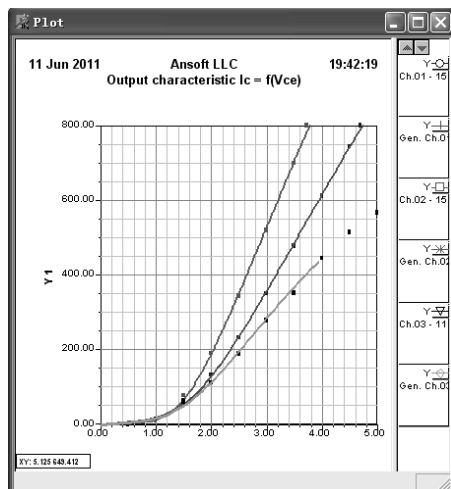


图 3-58 IGBT 输出特性曲线拟合结果

点击“下一步”按钮，进入 Freewheeling Diode Characteristic $I_f=f(V_f)$ [7/12]对话框，输入 125 及 25 度条件下对应的反向二极管特性曲线，分别如图 3-59 和图 3-60 所示。对应的曲线在 PDF 说明文档第 5 页（如图 3-61 所示）。



图 3-59 Freewheeling Diode Characteristic $I_f=f(V_f)$ [7/12]对话框（125 度条件下）

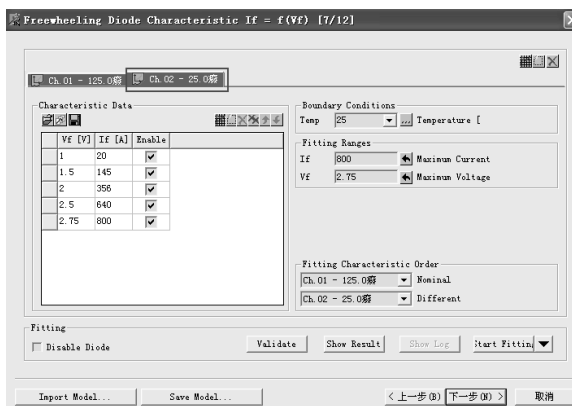


图 3-60 Freewheeling Diode Characteristic $I_f=f(V_f)$ [7/12]对话框（25 度条件下）

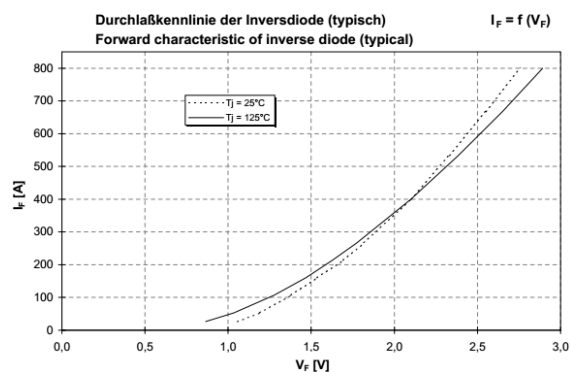


图 3-61 说明文档

先点击 Start Fitting 按钮,再点击 Show Result 按钮,将得到反向二极管特性曲线拟合结果,如图 3-62 和图 3-63 所示。

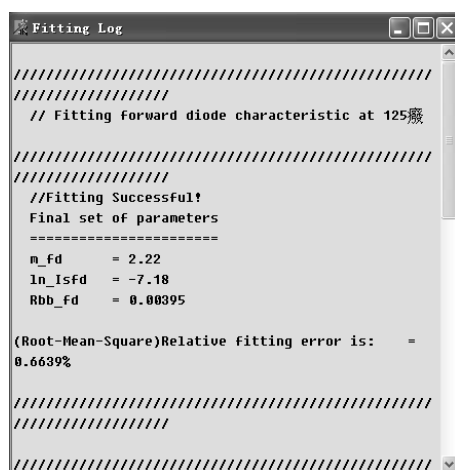


图 3-62 拟合日志

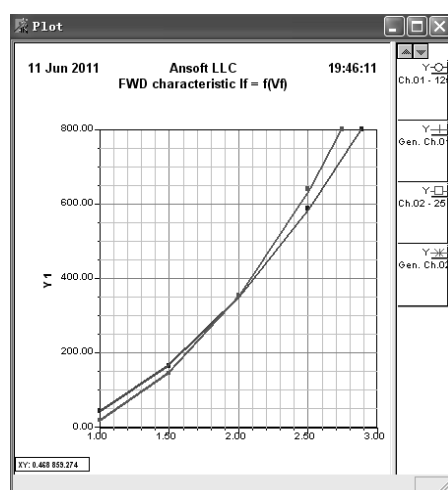


图 3-63 反向二极管特性曲线拟合结果

点击“下一步”按钮，进入 IGBT Thermal Model [8/12]对话框，模型方式选择 Fraction Model—Partial，如图 3-64 所示。将 PDF 说明文档第 7 页中的瞬态热阻抗参数输入到对应的框中（如图 3-65 所示），点击 Start Fitting 按钮，将弹出图 3-66 所示的拟合曲线，由 Continued/Partial Fraction Coefficients 框中的数据得到的拟合曲线与 PDF 中给出的瞬态热阻抗曲线相似。也可以采用 Transient Thermal Impedance 方式，将 PDF 中瞬态热阻抗曲线的数值直接输入到 Transient Thermal Impedance 框中，两种方式得到的结果是相同的。

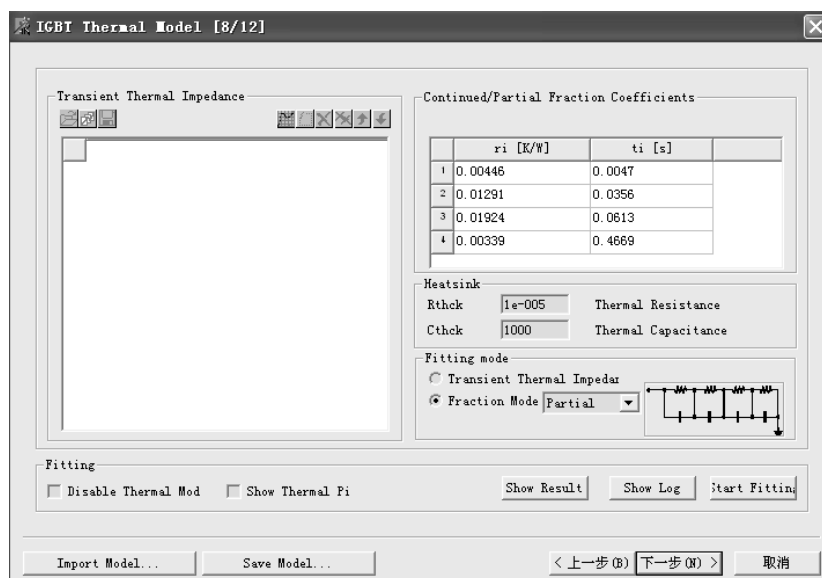


图 3-64 IGBT Thermal Model [8/12]对话框

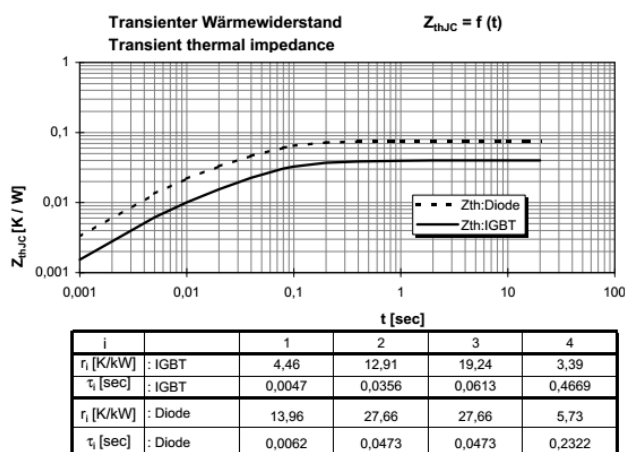


图 3-65 说明文档

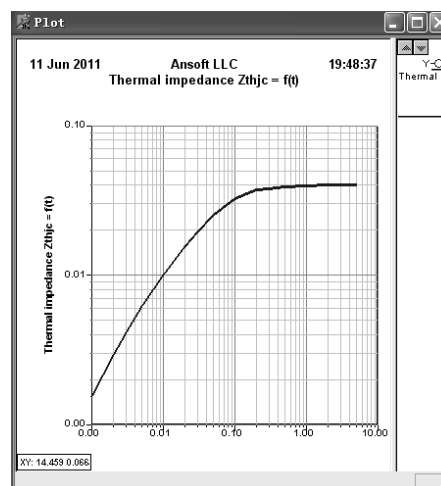


图 3-66 拟合曲线

点击“下一步”按钮，进入二极管瞬态热阻抗参数曲线 Freewheeling Diode Thermal Model [9/12]设置对话框，模型方式选择 Fraction Model—Partial，如图 3-67 所示。将图 3-65 中二极管参数输入到对应的框中，点击 Start Fitting 按钮，将弹出图 3-68 所示拟合曲线。

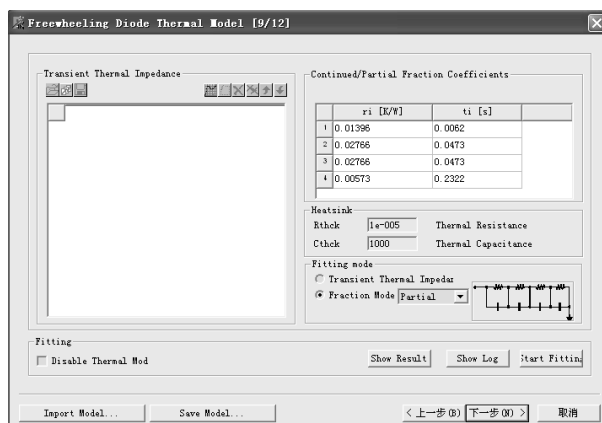


图 3-67 Freewheeling Diode Thermal Model [9/12]设置对话框

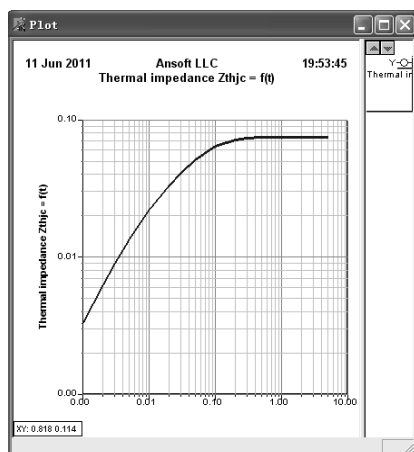


图 3-68 拟合曲线

点击“下一步”按钮，进入 Dynamic Model Input[10/12]对话框，将第二行中的 Enable 勾选上，如图 3-69 和图 3-70 所示。这里只考虑两种不同温度下的动态参数提取，根据所提供的数据也可以多考虑几种不同的工况。

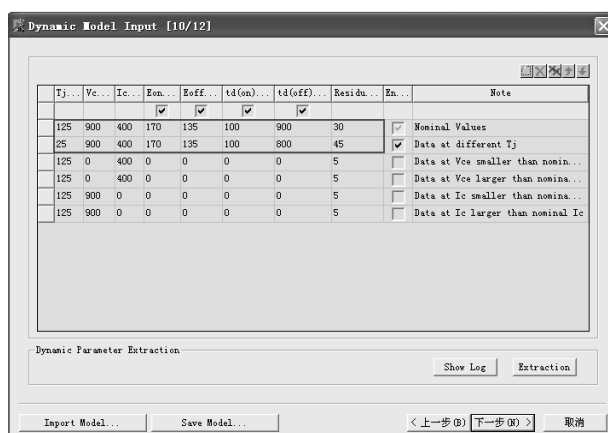


图 3-69 Dynamic Model Input[10/12]对话框



图 3-70 拟合完成

点击“下一步”按钮，进入 Dynamic Parameter Validation[11/12]对话框，如图 3-71 所示，点击右上角的“添加”按钮，添加图 3-72 中所勾选的两种工况，再点击 Validate 按钮，将得到图 3-73 所示的结果。

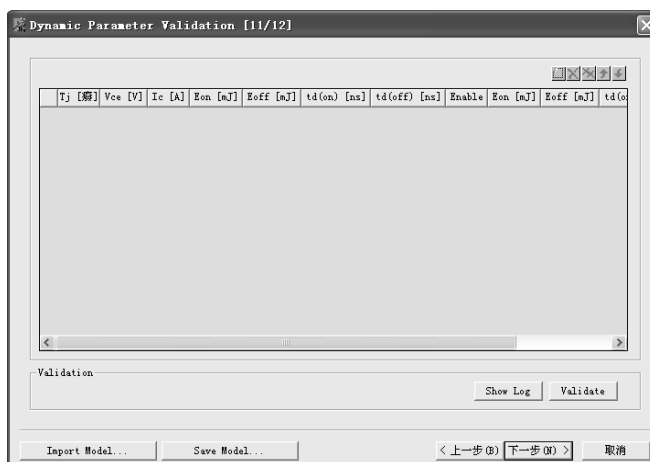


图 3-71 Dynamic Parameter Validation[11/12]对话框

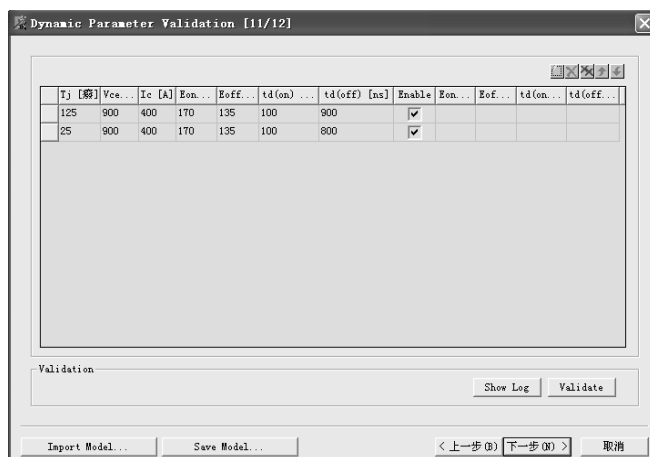


图 3-72 勾选两种工况验证

点击“下一步”按钮，进入 Model Parameters [12/12]对话框，显示模型所有参数，如图 3-74 所示。点击 Save Model...按钮，将上面每一步操作所建立的模型以.ppm 格式保存，这样方便以后调用及修改，如图 3-75 所示；也可以点击 Create SML 按钮将所建立的模型以 SML 格式保存，如图 3-76 所示。至此，BSM400GA170DLC 型号的 Basic Dynamic IGBT 模型创建完成，如图 3-77 所示。

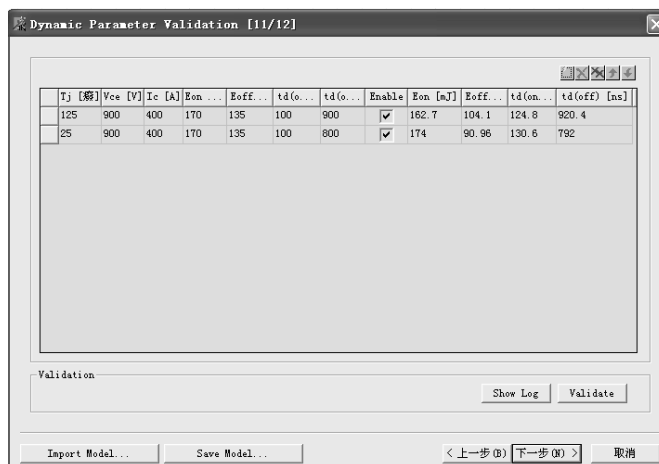


图 3-73 验证结果

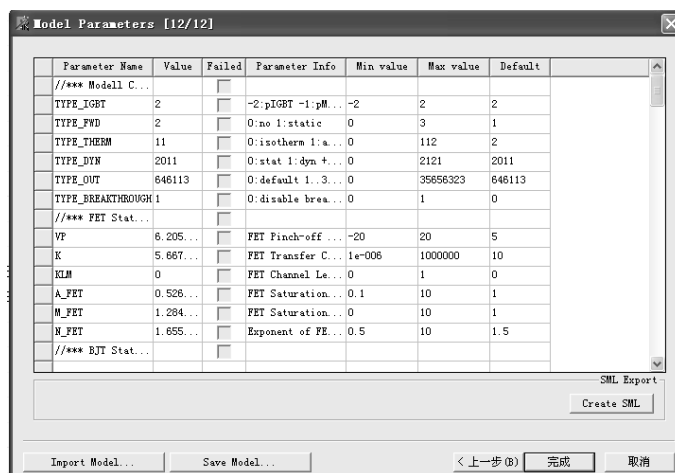


图 3-74 Model Parameters [12/12]对话框

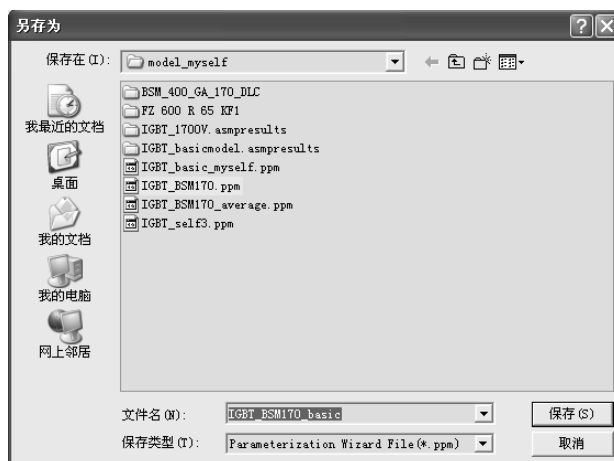


图 3-75 保存模型 (.ppm 格式)

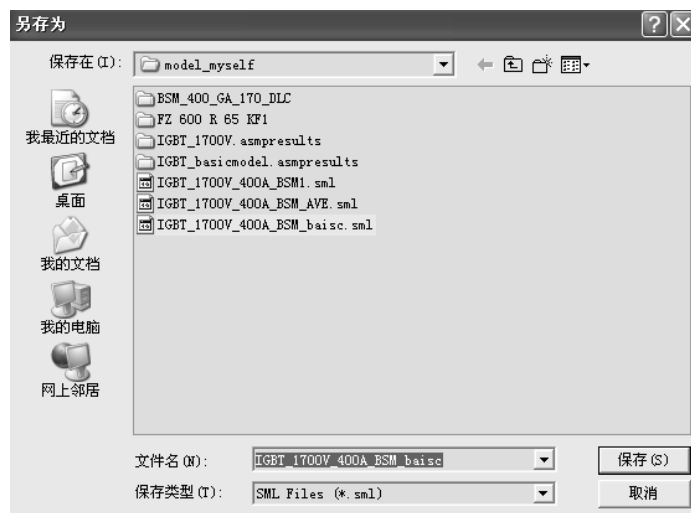


图 3-76 保存模型 (.sml 格式)



图 3-77 模型创建完成

2. Average IGBT 创建

Average IGBT 类型的模型创建步骤与 Basic Dynamic IGBT 类型大部分相似，不同的部分如图 3-78 至图 3-87 所示。

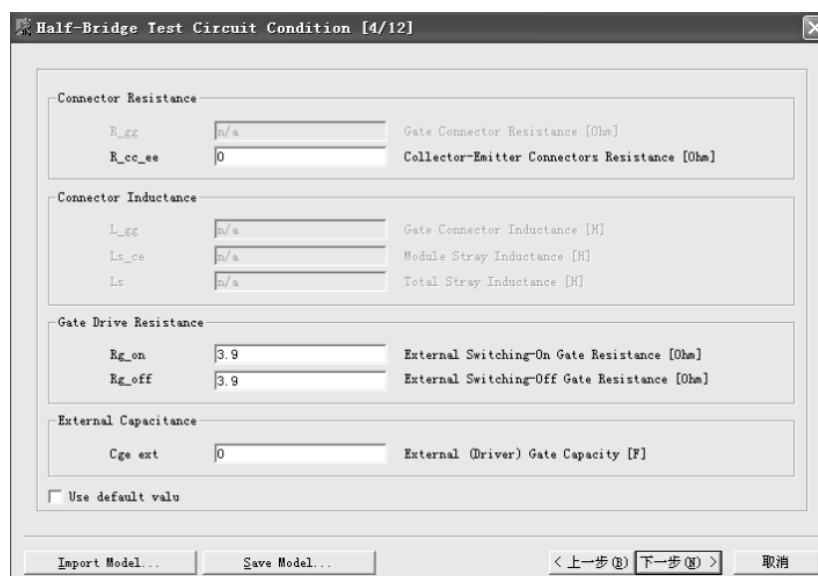


图 3-78 Half-Bridge Test Circuit Condition [4/12]对话框

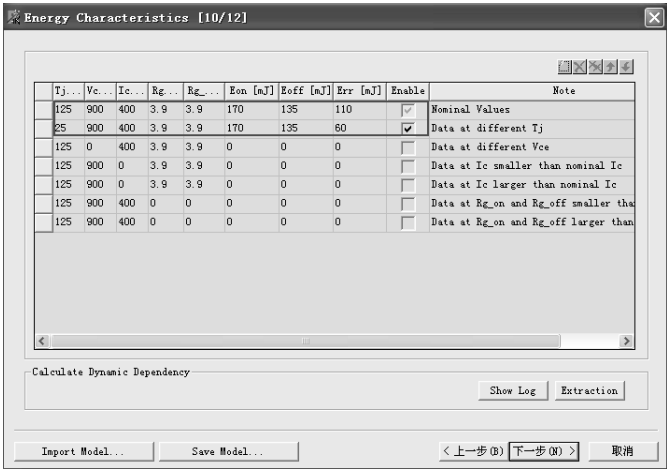


图 3-79 Energy Characteristic [10/12]对话框

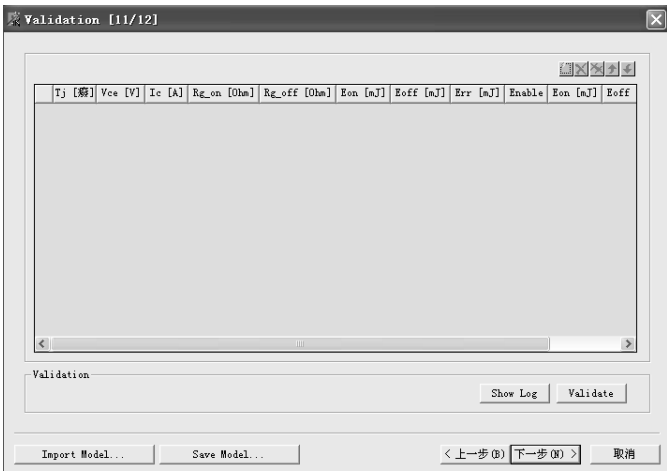


图 3-80 Validation [11/12]对话框

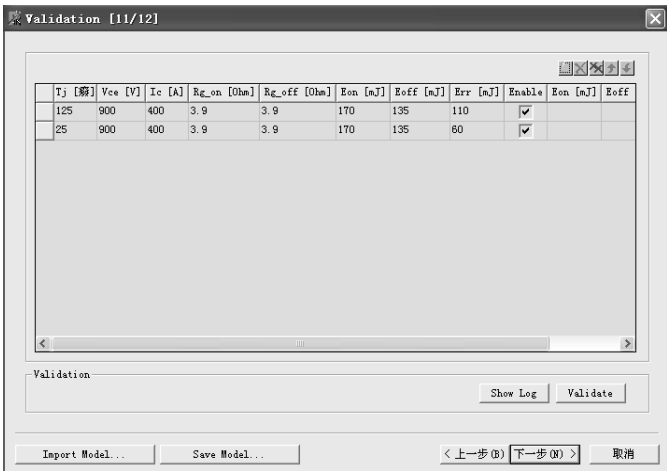


图 3-81 选择工况

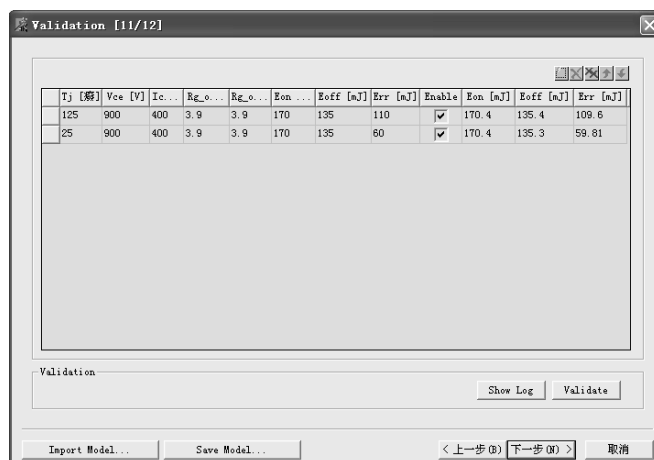


图 3-82 验证结果

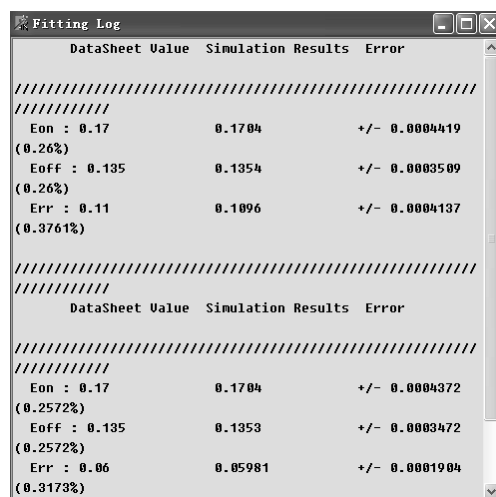


图 3-83 拟合日志

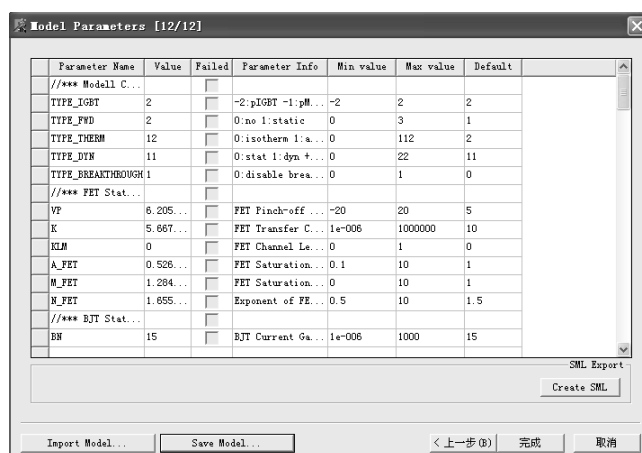


图 3-84 Model Parameters [12/12]对话框

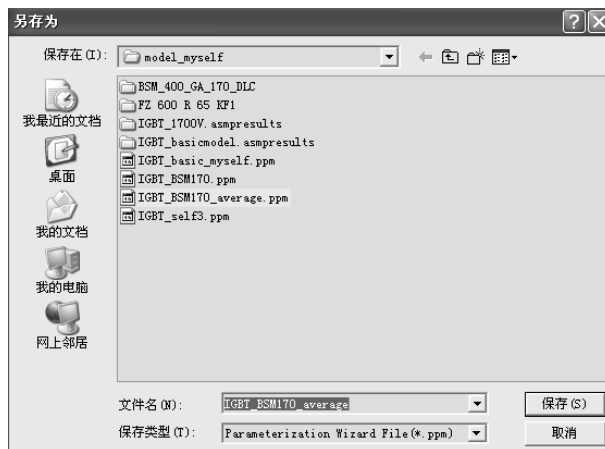


图 3-85 模型保存 (.ppm 格式)

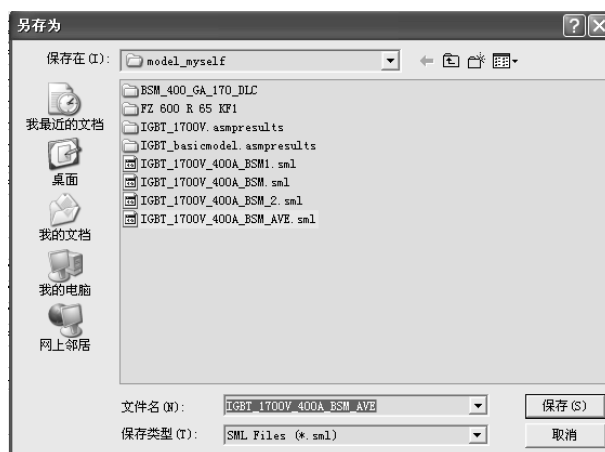


图 3-86 模型保存 (.sml 格式)



图 3-87 模型创建完成

Simplorer 10.0 中的 Advanced Dynamic IGBT、Power-MOSFET 模型自行封装步骤与上述大致相同，在此就不再进行举例说明。

3.4 仿真结果

基于上面建立的 Basic Dynamic IGBT 模型，对 IGBT 的关断及导通过程进行仿真，原理图及各项参数设置分别如图 3-88 至图 3-91 所示，结果如图 3-92 和图 3-93 所示。

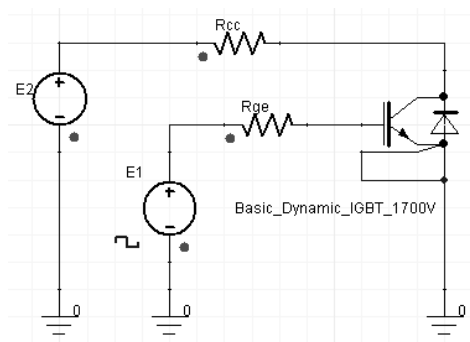


图 3-88 仿真原理图

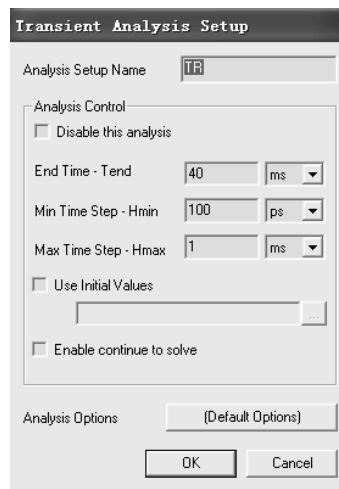


图 3-89 求解器及仿真步长设置

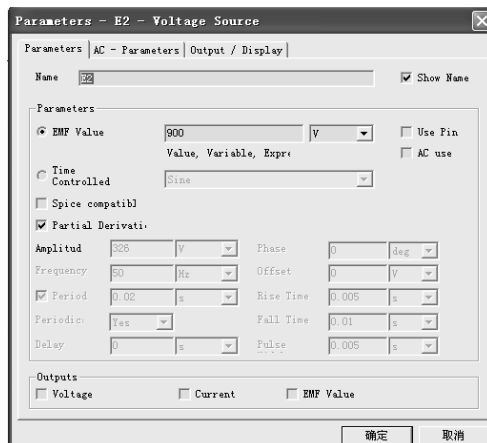


图 3-90 电源设置

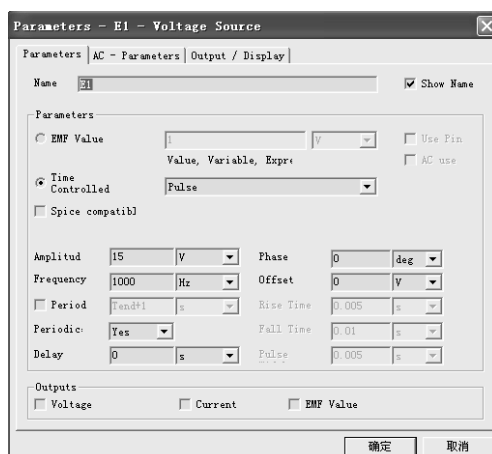


图 3-91 驱动电源设置

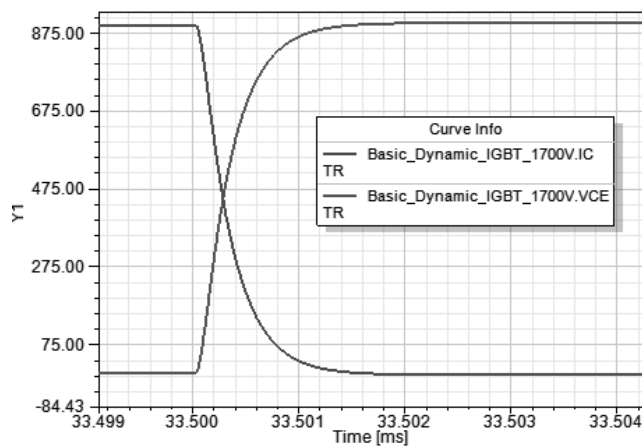


图 3-92 IGBT 关断过程

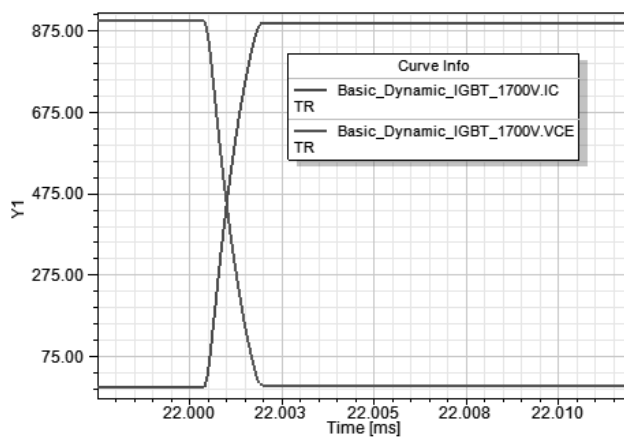


图 3-93 IGBT 导通过程

3.5 本章小结

本章主要对 IGBT 器件级模型创建步骤进行了详细说明，共分为 12 步。根据器件厂商提供的 Datasheet PDF 文件中的相应参数及特性曲线，自己进行模型封装，这样得到的 IGBT 动态模型导通、关断特性更加准确，计算 IGBT 器件的损耗特性也更加真实。最后以一款 BSM400GA170DLC 型号 IGBT 进行了实例介绍，并给出了 IGBT 关断、导通过程的仿真结果。