

基于晶体管 GP 模型的 Multisim 仿真建模方法^①

黄 华, 祝诗平, 刘碧贞

西南大学 工程技术学院, 重庆 400716

摘要: 在现代电子电路设计中, 先对电路进行前期软件仿真已经是必不可少的环节, 然而仿真结果的可信度和真实度又取决于建立的仿真模型正确与否. Multisim 仿真软件提供了部分型号三极管的仿真模型, 但不够全面. 对于特定三极管, 需要在仿真软件中建立相应的仿真模型, 以得到较理想的仿真结果. 利用三极管的数据手册, 介绍在 Multisim 仿真软件中建立三极管 GP 模型的方法, 并对 2N3903 型三极管的仿真模型与实物分别进行了直流扫描和交流特性对比分析. 从直流扫描分析结果中可以看出: 在饱和区, 仿真曲线与实测曲线基本上一致; 在放大区, 仿真曲线与实测之间有一定的差异, 但是平均相对误差小于 10%. 主要原因是晶体管存在分散性, 而数据手册提供的是平均特性. 从波特图仿真与实测结果中可以看出仿真的 3dB 通频带要比实际 3dB 通频带宽, 主要原因是仿真模型中只考虑了三极管的极间电容影响, 没有考虑三极管衬底电容的影响. 实验结果表明利用该方法建立的仿真模型与实测数据基本上一致.

关 键 词: 仿真建模; 晶极管; GP 模型; Multisim 软件

中图分类号: TN32

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)01-0136-06

随着半导体技术的发展, 现代电子电路设计方式发生了改变, 由从万能板上焊接电路原型方式变成了通过计算机仿真软件完成. 目前电路仿真软件有 Multisim, Protel, Orcad, Pspice, Proteus 等. Multisim, Orcad 和 Pspice 都可以进行复杂模拟电路和数字电路的仿真; Protel 除了可以完成 PCB 板的设计外, 也可以进行简单的模拟和数字电路仿真; Proteus 可以进行直观的模拟与数字电路、单片机、ARM 仿真. 无论何种仿真软件, 都需要先建立元件的仿真模型, 有的仿真软件使用的是器件的理想模型, 有的是建立了近似于实物的仿真模型, 这样使得仿真结果与实测结果比较接近. 所以准确地提取器件模型参数是得到正确仿真结果的前提. 在 Multisim 中提供了部分型号三极管的仿真模型, 但这些仿真模型对许多常用型号的三极管仍不适用. 本文给出了如何利用晶体三极管的数据手册, 在 Multisim 中建立相应仿真模型的一种方法, 并对 2N3903 型晶体三极管的仿真数据与实测数据进行了比较分析.

1 三极管的 Gummel-Poon 模型

由于晶体三极管良好的高速性能, 它在半导体设备和集成电路中得到了广泛的使用. 晶体三极管的模型有很多, 最常用的有 Ebers-Moll 模型(简称 EM 模型)和 Gummel-Poon(简称 GP 模型). 其中 EM 模型是根据 BJT 的基本电流方程, 建立起器件性能与材料、结构和工艺参数之间的关系. 从简单非线性直流模型 EM1 逐渐改进, 已发展成为包括各种效应的较为完善的通用模型 EM3^[1]. 1970 年 Hermann Gummel 和

^① 收稿日期: 2014-10-14

基金项目: 西南大学博士基金项目(SWU116044); 西南大学教学改革研究项目(2016JY012).

作者简介: 黄 华(1981-), 男, 重庆垫江人, 博士, 讲师, 主要从事系统检测与控制研究.

通信作者: 祝诗平, 教授, 博士研究生导师.

H. C. Poon 在贝尔实验室第一次发表了关于三极管 GP 模型的论文. GP 模型与 EM 模型一样, 都是概括双极型晶体管电学特性的物理模型^[2-4]. GP 模型是通过分析基区多数载流子电荷的作用, 建立起器件性能与基区多数载流子电荷的联系. GP 模型数学处理简单, 可有效地处理大信号问题且精度高. GP 模型的等效电路如图 1 所示^[2].

GP 模型和它的改进版本被仿真软件广泛采用. 在 GP 模型中一个重要的特点是包括了 β_F (三极管的正向放大系数) 和 β_R (三极管的反向放大系数) 随着电流的变化. 当将一些参数忽略时, GP 模型就可以简化成 EM 模型. 在 SPICE 仿真软件中, 包括的 GP 模型中有 41 个参数^[5-7]. 部分参数说明如表 1 所示.

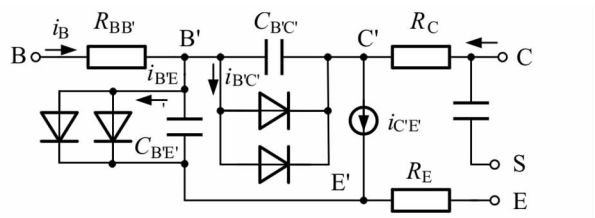


图 1 GP 模型的等效电路

GP 模型的基极电流方程如式(1) 所示^[2]:

$$i_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left\{ \exp \left[\frac{V_{BE}}{N_F V_T} \right] - 1 \right\} + I_{SE} \left\{ \exp \left[\frac{V_{BE}}{N_E V_T} \right] - 1 \right\} + \frac{I_S}{\beta_R} \left\{ \exp \left[\frac{V_{BC}}{N_R V_T} \right] - 1 \right\} + I_{SC} \left\{ \exp \left[\frac{V_{BC}}{N_C V_T} \right] - 1 \right\} \quad (1)$$

GP 模型的集电极电流方程如式(2) 所示^[2]:

$$i_C = \frac{I_S}{N_{qB}} \left\{ \left(\exp \left[\frac{V_{BE}}{N_F V_T} \right] - 1 \right) - \left(\exp \left[\frac{V_{BC}}{N_R V_T} \right] - 1 \right) \right\} - \frac{I_S}{B_R} \left\{ \exp \left[\frac{V_{BC}}{N_R V_T} \right] - 1 \right\} - I_{SC} \left\{ \exp \left[\frac{V_{BC}}{N_C V_T} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

式中: $N_{qB} = \frac{q_{1s}}{2} (1 + \sqrt{1 + 4q_{2s}})$.

q_{1s} 代表基区宽度调制效应^[2]:

$$q_{1s} = \left(1 - \frac{B_{BE}}{V_{AR}} - \frac{V_{BC}}{V_{AF}} \right)^{-1} \quad (3)$$

q_{2s} 代表高能级注入影响^[2]:

$$q_{2s} = \frac{I_S}{I_{KF}} \left[\exp \left(\frac{V_{BE}}{N_F V_T} \right) - 1 \right] + \frac{I_S}{I_{KR}} \left[\exp \left(\frac{V_{BC}}{N_R V_T} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

GP 模型的发射结电容方程如式(5) 所示^[2]:

$$C_{BE} = \frac{C_{JE}}{[1 - V_{BE}/V_{JE}]^{M_{JE}}} + \frac{T_{FF}}{N_F V_T} \frac{I_S}{N_{qB}} \exp \left(\frac{V_{BE}}{N_F V_T} \right) \quad (5)$$

GP 模型的集电结电容方程如式(6) 所示^[7]:

$$C_{BC} = \frac{C_{JC}}{[1 - V_{BC}/V_{JC}]^{M_{JC}}} + \frac{T_R}{N_R V_T} \frac{I_S}{N_{qB}} \exp \left(\frac{V_{BC}}{N_R V_T} \right) \quad (6)$$

其中 T_{FF} 如式(7) 所示^[2].

$$T_{FF} = T_F \left\{ 1 + X_{TF} \left[\frac{i_f}{i_f + I_{FF}} \right]^2 \exp \left[\frac{V_{BC}}{1.44 V_{TF}} \right] \right\} \quad (7)$$

表 1 BJT 管 GP 模型部分参数

符号	名称	符号	名称	符号	名称	符号	名称
V_{BE}	BE 结电压	V_{JE}	BE 结内建电势	V_{AR}	正身厄尔利电压	C_{JE}	BE 结零偏置耗尽电容
V_{BC}	BC 结电压	V_{JC}	BC 结内建电势	V_{AF}	反身厄尔利电压	C_{JC}	BC 结零偏置耗尽电容
V_T	温度电压	M_{JE}	BE 结梯度因子	N_F	正向电流发射系数	X_{TF}	T_F 随温度变化系数
β_F	正向电流增益	M_{JC}	BC 结梯度因子	N_R	反向电流发射系数	V_{TF}	T_F 随 U_{BC} 变化的电压
β_R	反向电流增益	I_S	传输饱和电流	N_E	BE 结漏电流系数	I_{KF}	正向大电流下降点
T_F	正向传输时间	I_{SE}	BE 结饱和漏电流	N_C	BC 结漏电流系数	I_{KR}	反向大电流下降点
T_R	反向传输时间	I_{SC}	BC 结饱和漏电流	I_{TF}	TF 的大电流参数	i_f	正向扩散电流

2 在 Multisim 中建立三极管的 GP 仿真模型

NI Multisim 是集原理图绘制和仿真于一体的电子电路工作平台. NI Multisim 的分析功能由 SPICE

提供^[8-9]. Multisim 提供了两种元件建模的方式, 一种是利用 Multisim 提供的模型建立器. 通过设置三极管的类型、基极-发射极的最高反向电压、输出电阻、开关特性和电容特性等, 设置完之后可以生成一个 SPICE 仿真模型. 另一种方式是对现有的 SPICE 模型直接进行修改, 得到新的仿真模型. 在 Multisim 中, 根据器件的数据手册参数可以快速地建立三极管的仿真模型. 每一个模型的参数是对一个特定器件适用, 但是这些数值是可以改变的. 利用数据手册时, 应当注重不同的数据手册提供元件参数的形式是不同的, 有的是用表格的形式给出参数, 有的是用图形的形式给出参数. 在利用 Multisim 建立三极管的仿真模型时, 这两种形式的参数均要用到.

下面以 2N3903 型三极管为例, 介绍如何根据数据手册上提供的参数, 在 Multisim 中利用模型建立器设置三极管 GP 模型参数. 在 Multisim 的模型建立器中包括基本设置、电容设置、直流增益设置、动态特性设置选项卡.

2.1 基本选项参数设置

在 Multisim 模型建立器的基本选项设置中, 包括晶体管的类型、材料、工作温度、极限参数、输出电导以及开关特性设置. 在晶体管类型中选择 NPN, 材料选择 Si, 工作温度参数使用默认值. 根据数据手册得到 2N3903 型三极管的基极与发射区的反向电压 $V_{EBO} = 6\text{ V}$. 在数据手册的小信号特性表中找到输出电导. 注意数据手册提供的是输出电导的最大值和最小值, 而模型建立器中需要输入一个典型值. 根据数据手册, 2N3903 型三极管输出电导的最大值为 $40\text{ }\mu\text{mho}$, 最小值为 $1\text{ }\mu\text{mho}$, 取一个典型值 $30\text{ }\mu\text{mho}$, 并将测试条件 $I_C = 1.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ V}$ 也填入输出电导表中. 在数据手册的开关特性中找到存储时间 $t_s = 175\text{ ns}$, 并将测试条件, 集电极电流 $I_C = 10\text{ mA}$, 基极电流 $I_{B1} = I_{B2} = 1.0\text{ mA}$ 填入基本选项的开关特性中. 根据 2N3903 型晶体管数据手册提供的以上参数完成基本选项设置如图 2 所示.

General

Type of BJT: NPN

Type of semiconductor: Si

Nominal temperature: 27 °C

Base temperature for input: 25 °C

Maximum ratings

Emitter-base maximum voltage (VEBO): 6 V

Output admittance

☐ Check if data not available

Output admittance (hoe): 30 μmho

at: Collector current (Ic1): 1 mA

Collector-emitter voltage (Vce): 10 V

Switching characteristics

Storage time (ts): 175 ns

at: Collector current (Ic2): 10 mA

Base current (Ib1): 1 mA

Base current (Ib2): 1 mA

图 2 基本选项设置

2.2 电容设置

在模型建立器的电容特性选项卡中, 包括发射结电容(或输入电容)和集电结电容(或输出电容)设置. 在数据手册中, 电容特性通常是以曲线的形式给出输入电容和输出电容与反向电压之间的关系. 在这个关系曲线中, 找到反向电压最低时的电容值和反向电压最高时的电容值, 再取反向电压最小值和最大值之间的两个中间值. 查找 2N3903 型三极管的数据手册可知, 当输入电容的反向电压最小值为 100 mV 时电容 $C_{eb1} = 4.3\text{ pF}$, 当最高反向电压为 5 V 时电容 $C_{eb4} = 2.5\text{ pF}$, 再取两个中间值, 反向电压为 300 mV 时电容 $C_{eb2} = 4\text{ pF}$, 反向电压为 1.5 V 时电容 $C_{eb3} = 3\text{ pF}$. 同样的方法设置输出电容值, 当反向电压最小值为 100 mV 时电容 $C_{cb1} = 3.5\text{ pF}$, 当最高反向电压为 40 V 时电容 $C_{cb4} = 1.5\text{ pF}$, 再取两个中间值, 反向电压为 600 mV 时电容 $C_{cb2} = 3\text{ pF}$, 反向电压为 5 V 时电容 $C_{cb3} = 2\text{ pF}$. 根据数据手册的以上参数完成电容特性本选项卡设置, 如图 3 所示.

2.3 直流增益设定

在模型建立器的直流增益选项卡中, 包括常温下直流增益设置和在特定温度下直流增益设置. 常温下的直流增益设置, 可以利用数据手册提供的直流增益与集电极电流之间的关系曲线得到. 查找 2N3903 型三极管的数据手册可知: 当集电极电流最小值为 $100\text{ }\mu\text{A}$ 时, 直流增益 $h_{fe1}=70$; 然后取一个中间点, 当集电极电流为 5 mA 时直流增益 $h_{fe2}=100$; 找到最大直流增益 $h_{fe_max}=150$, 以及当增益下降为最大值的 $1/2$ 时两个集电极电流, 分别为 $I_L=150\text{ }\mu\text{A}$, $I_{kf}=50\text{ mA}$. 同样的方法完成温度在 $125\text{ }^\circ\text{C}$ 时的直流增益设置(图 4).

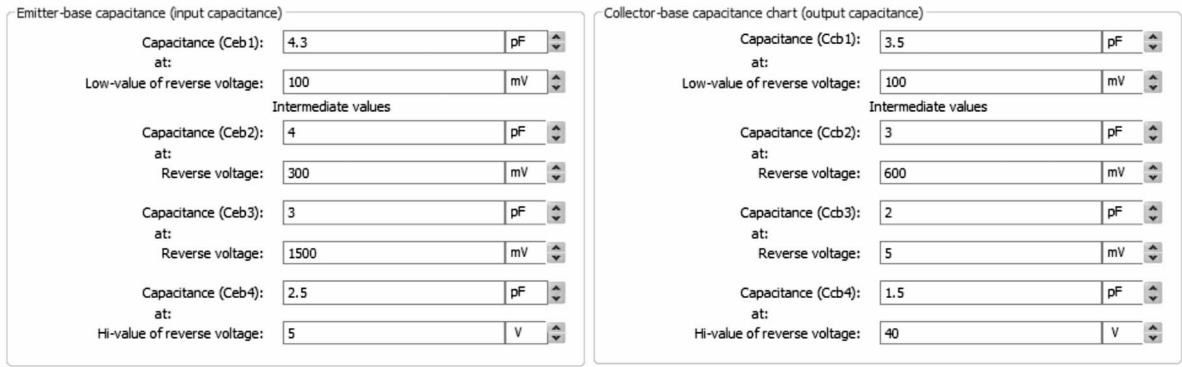


图 3 电容特性选项卡

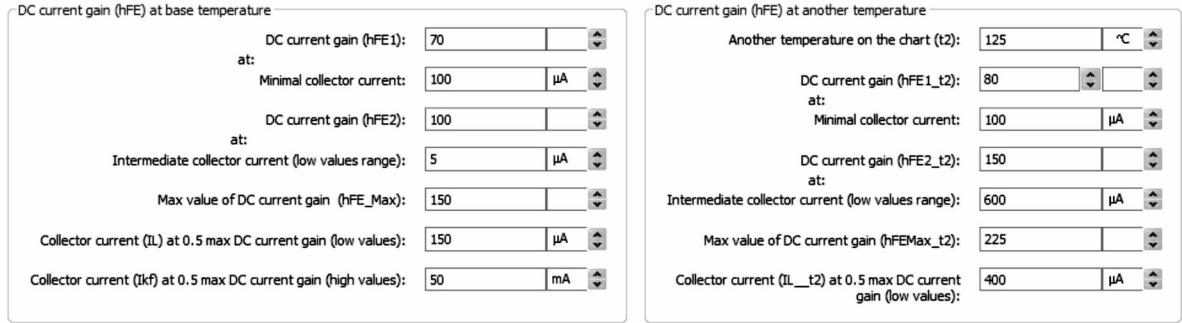


图 4 直流增益选项卡

类似的方法在 2N3903 型三极管的数据手册中找到饱和特性参数和温度系数参数, 然后填入动态特性选项卡中.

3 仿真与实测数据比较分析

利用上述方法完成 2N3903 型晶体三极管的 GP 模型建模, 在 Multisim 的仪表面板上找到 IV 测试仪, 按图 5 所示电路连接线路, 测试晶体三极管的输出特性曲线. 2N3903 型晶体三极管的输出特性曲线实测连接电路如图 6 所示^[10].

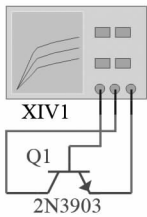


图 5 2N3903 型晶体管输出特性 Multisim 仿真

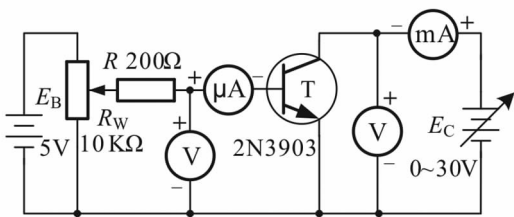


图 6 2N3903 型晶体管输出特性实测原理图

在 Multisim 中对建立的模型进行直流扫描分析和交流特性分析, 并将仿真结果与实测结果进行比较.

直流扫描仿真和实测数据如图 7 所示, 图 7 中横坐标表示集电极电源电压, 大小从 0 V 到 30 V 按 1 V 的步进变化, 纵坐标表示集电极的电流. 在饱和区仿真曲线与实测曲线基本上一致, 因为在饱和区, 集电极电流由集电极电压和集电极电阻决定, 基本上满足欧姆定律. 在放大区, 仿真曲线与实测之间有一定的差异, 但是平均相对误差小于 10%. 主要原理是晶体管存在分散性, 数据手册提供的是平均特性. 波特图仿真与实测结果如图 8 所示, 仿真的 3 分贝通频带要比实际 3 分贝通频带宽, 主要是由于仿真模型中只考虑了三极管的极间电容影响, 没有考虑三极管衬底电容的影响.

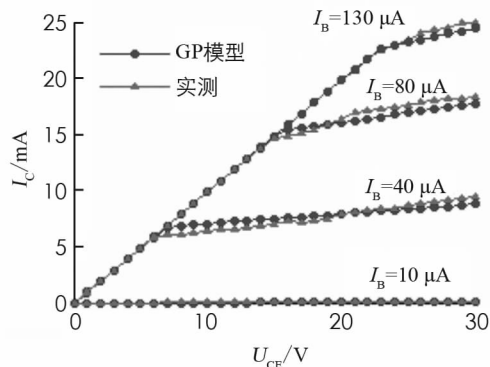


图 7 GP 模型与实测的晶体管输出特性曲线比较

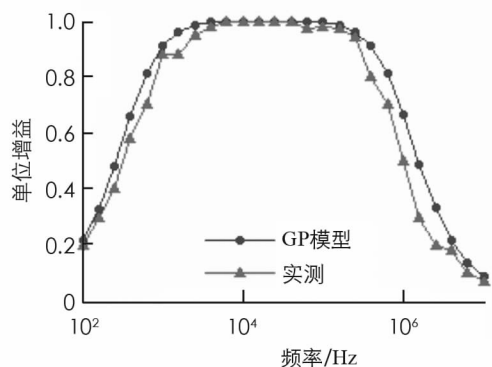


图 8 GP 模型与实测的晶体管波特图比较

4 结 论

三极管的 GP 模型已经成了工业标准, 并在仿真软件中广泛应用. 在 Multisim 中提供了部分型号三极管的仿真模型, 但这些仿真模型对许多常用型号三极管仍不适用. 本文给出了如何利用三极管的数据手册, 在 Multisim 中建立晶体三极管 GP 仿真模型的一种方法, 并对三极管的仿真数据与实测数据进行了比较分析. 实验结果表明利用该方法建立的仿真模型与实测数据基本上一致. 但在 GP 模型中, 三极管的交流模型参数 T_F 建模不是物理的, 也不是精确的, T_R 参数不是电流和电压的函数, 也没有考虑寄生三极管的影响, 所以仿真结果与实测之间仍在一定的差距, 但总的误差小于 10%. 实验结果表明, 该方法可以应用于晶体管的 Multisim 仿真建模.

参考文献:

- [1] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] SISCHKA F. Gummel Poon Bipolar Model [M]. Munich: Agilent Technologies, 1990.
- [3] LINDER M, INGVARSON F, JEPPSON K O, et al. On DC Modeling of the Base Resistance in Bipolar Transistors [J]. Solid-State Electronics, 2000, 44(8): 1411—1418.
- [4] KUZNETSOV S P. Plykin Type Attractor in Electronic Device Simulated in Multisim [J]. Chaos, 2011, 21(4): 1869—1895.
- [5] CAO X, MCMACKEN J, STILES K, et al. Comparison of the New VBIC and Conventional Gummel-Poon Bipolar Transistor Models [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2000, 47(2): 427—433.
- [6] 熊俊俏, 戴丽萍, 刘海英. 双极型三极管 EM 模型与 GP 模型分析和应用 [J]. 北华航天工业学院学报, 2010, 20(B07): 52—54, 59.
- [7] DAAMI A, VAILLANT J, GWOZIECKI R, et al. A Complete SPICE Subcircuit-Based Model Library for Organic Photodiodes [J]. Solid-State Electronics, 2012(75): 81—85.
- [8] 张藤予. 基于 Multisim 仿真教学模式分析及应用 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(6): 230—232.
- [9] 张 宁. 基于 Multisim 的电子线路分析与仿真 [J]. 现代电子技术, 2012, 35(2): 31—32.
- [10] 祝诗平, 黄 华. 电子技术实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.

On Multisim Simulation Approach for Bipolar Junction Transistor Based on Gummel-Poon Model

HUANG Hua, ZHU Shi-ping, LIU Bi-zhen

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: It is necessary to use simulation software in modern electronic circuits designing. The credibility and fidelity of the simulation results depend on whether the simulation model is correct or not. There are many types of transistor simulation models which are provided by the Multisim simulation software, but it is not complete. For some special transistor which simulation model can not find in Multisim, so establishing the new simulation model in Multisim to obtain a more satisfactory simulation results is required. The article presents a method of building bipolar transistor model through transistor database. Both DC sweep analysis and AC analysis have been operated in simulation model and physical model for 2N3903 transistor. From the result of DC sweep analysis, the simulation curve and the measured curves are of substantial uniform in transistor saturation mode. There are some differences between the simulation curve and measured curve in transistor active mode, but the average error is less than 10%. The main reason is transistor dispersion and the average characteristics have been provided by database. The 3dB bandwidth of simulation is wider than experimental results. Because the transistor electrode capacitance affect only considered in the simulation model, which did not consider the impact of the transistor substrate capacitance. The results of the experiment show that the simulation model from the method is nearly consistent with the measured data.

Key words: simulation; bipolar junction transistor; Gummel-Poon Model; Multisim

责任编辑 陈绍兰

实习编辑 包 颖