

双极型 晶体管模型

Ian E. 格特鲁 著

科学出版社

电子电路计算机辅助设计丛书之一

双极型晶体管模型

Ian E. 格特鲁 著

周宁华 陈幼松 译

科学出版社

1981

内 容 简 介

本书系一九七八年荷兰出版电子电路计算机辅助设计丛书第一册，它从比较实用的角度系统讲述了电子电路计算机辅助设计的最基础问题——如何建立双极型晶体管模型。全书共分三章，第一章介绍计算机辅助设计的用途、各种模型与器件物理的关系、模型的符号及其选用；第二章叙述 EM_1 , EM_2 , EM_3 及 GP 等模型的理论推导；第三章介绍了上述模型各种参数的测量方法。书末有六个附录，对某些专门问题作了较深入的讨论。

本书内容全面、系统性强、物理概念清晰，可供从事电子电路设计的科技人员阅读，也可作为高等学校有关专业师生的参考书。

Ian E. Getreu

CAD OF ELECTRONIC CIRCUITS, 1 MODELING THE BIPOLAR TRANSISTOR

Elsevier Scientific Publishing Company
Amsterdam, Oxford, New York, 1978

电子电路计算机辅助设计丛书之一

双极型晶体管模型

Ian E. 格特鲁 著

周宁华 陈幼松 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 1 月第 一 版	开本：787×1092 1/32
1981 年 1 月第一次印刷	印张：7 1/8
印数：0001—5,200	字数：159,000

统一书号：15031·327

本社书号：2007·15—7

定价：1.10 元

译 者 序

本书系 1978 年荷兰出版的电子电路计算机辅助设计丛书第一册,它介绍怎样建立双极型晶体管的模型。本丛书由英国伦敦帝国理工学院 (Imperial College of Science and Technology London, U.K.) Robert Spence 教授主编,本书作者系美国 Tektronix 研究所的研究人员。

随着计算机的普遍推广,无论是分立元件电路或是集成电路,采用计算机辅助设计技术已经日益成为设计手段的主流。这种技术的优点不仅在于可以对所设计的电路进行计算机实验(即计算出电路的频率特性和瞬态响应)、确定电路传递函数的零点和极点、对电路进行理想分析以及进行噪声和最不利情况的统计分析等,而且还可以对电路中的各种元件进行容差分析,使用远较人工计算时精确和复杂的器件模型以得到更符合实际情况的计算结果,从而实现电路的最佳设计。

然而,所有这一切计算结果是否精确和有效,一方面固然取决于所选用的计算方法和数学模型,但另一方面在很大程度上还取决于怎样合理地建立电路中有源器件的线性模型,而这个问题正是历来计算机辅助设计文献中讨论得最不充分的论题之一。因此,以当前使用最广泛的双极型晶体管的模型建立问题为专题讨论对象,并以此作为该丛书的第一册是很恰当的。

作者从器件物理的角度详细阐述了双极型晶体管模型据以建立的各种效应。读者从中可以了解到人们对各种模型所

作的假设以及各类模型的局限性。这样也就阐明了从最简单的模型到目前最完善的模型之间的发展过程。

本书所采用的模型参数和符号，主要针对美国加利福尼亚大学伯克利分校所设计的三种著名程序 (SLIC, SINC 以及 SPICE)。这样做既反映了选材的先进性、实践性，同时也不失其普遍性。因为只要稍加变换即可用于其他程序之中。

本书的某些内容曾在 1974 年美国“电子学”(Electronics)杂志上连载过。以后又经补充和发展而编著成书。译者认为它对我国这一领域的读者是有参考价值的。但限于水平，译文中谬误之处在所难免，希读者多加指正。

本书由陈幼松翻译，周宁华审校。

周宁华 陈幼松
1979 年 9 月于北京

目 录

译者序

第一章 绪论	1
计算机辅助设计的用途	1
目的	2
结构	2
符号及其确定原则	3
输入参数和模型参数	4
模型同器件物理之间的关系	5
模型的符号	6
模型的选用	7
第二章 各种模型的理论推导	8
2.1 引言	8
2.2 EM_1 模型	8
2.2.1 注入型模型	10
2.2.2 传输型模型	13
2.2.3 变型的模型——非线性混合 π 模型	15
2.2.4 温度变化	17
2.2.5 小结及评述	18
2.3 EM_2 模型	22
2.3.1 改进的直流特性	22
2.3.2 电荷储存效应	25
2.3.3 小信号(线性化)的 EM_2 模型	34
2.3.4 小结	35
2.4 EM_3 模型	37
2.4.1 在给定温度下改进的直流模型	38

2.4.2	在给定温度下改进的电荷储存模型	53
2.4.3	改进的随运用温度的变化关系	56
2.4.4	小信号(线性化)的 EM_3 模型	58
2.4.5	小结与结论	58
2.5	GP 模型	60
2.5.1	引言	60
2.5.2	I_S 的物理定义	64
2.5.3	Q_B 的各种分量	71
2.5.4	q_b 的估算	78
2.5.5	基区展宽效应	94
2.5.6	GP 模型同 EM_3 模型的比较	99
2.5.7	小信号(线性化)的 GP 模型	103
2.5.8	小结	104
2.6	各种模型的局限性	105
第三章	参数测量	109
3.1	引言	109
3.2	EM_1 模型的参数测定	110
	β_F	111
	β_R	112
	I_S	113
	T_{nom}	115
	E_g	116
3.3	EM_2 模型的参数测量	116
	r'_e	118
	r'_c	121
	r'_b	128
	C_{j0} , ϕ 和 m	139
	τ_F (或者在 I_C , V_{CE} 下的 f_T)	143
	τ_R (或者 τ_{SAT})	149
	C_{SUB} 或者 C_{CS}	151

3.4	EM ₃ 模型的参数测量	152
	V_A	153
	β_{FM} , C_2 , n_{EL} 及 θ (或者 β_F MAX, I_C MAX, β_F LOW, I_C LOW, $BCEC$ 以及 V_{CE})	158
	β_{RM} , C_4 , n_{CL} 以及 θ_R	169
	RATIO	170
	L_E/W , I_{CO}	170
	TC_1 , TC_2	172
3.5	GP 模型的参数测量	173
	I_{SS}	173
	V_B	174
	I_K	179
	I_{KR}	181
	B	181
附录一	使用传输符号与使用注入符号的比较	184
附录二	EM ₃ 模型基区宽度调制的分析	187
附录三	GP 模型中 Q_B 五个分量的推导	192
附录四	EM ₃ 和 GP 基区宽度调制模型的精确度	194
附录五	小信号、线性化的 EM ₃ 和 GP 模型	199
附录六	SLIC, SINC 以及 SPICE 程序中的各种输入参数对照表	206
参考文献		213

第一章 绪 论

计算机辅助设计的用途

在分立电路与集成电路的设计中，日益广泛地利用计算机作为工具，这已经不是什么新鲜的事情了。尽管人们通常只认识到用计算机可以便宜而快速地得到实验模型，然而计算机辅助设计（CAD）却可使电路设计者得以实现用其他方法所无法完成的工作。利用计算机所能完成的工作有：

不需要象在一个真实电路中那样通过加载进行探测，就能够观察电压和电流的波形及其频率响应；

不用引入寄生参量的模拟，就能预估一个集成电路的高频性能；

可用经过选择的理想器件，例如采用一个带宽无限或增益极高的器件，以去除各种器件参数对电路性能的影响。换句话说，可以进行“理想化”的分析；

可以往一个电路里馈进各种理想波形，例如极为快速的脉冲、或者脉冲与正弦波的混合波形；

可以把直流电路分离出来，以便了解电路的基本部分；

可以把反馈回路开路而不干扰直流电平；

甚至对大型电路，也能够确定其传递函数的极点和零点；

可以进行噪声、敏感度、极端（不利）情况的分析以及统计分析。

目 的

今天, 电路设计者已经具有可以借以进行各种类型分析的程序. 然而, 不同的程序使用不同的输入格式、规则、符号以及器件模型, 这对缺乏经验的使用者来说, 将是十分复杂和困难的. 幸好, 程序的输入格式和规则通常在文件中都有明确的记载, 因此如果发生错误也比较容易发现(由计算机、程序或使用者发现). 因而, 最成问题的是符号、所用的器件模型以及模型参数的测量方法还没有标准化.

本书的目的在于通过系统地论述如何建立双极型结型晶体管 (BJT) 模型, 来消除在建立模型方面的混乱状态. 重点放在非线性直流与暂态分析中所使用的非线性、大信号模型, 因为人们所遇到的模型建立方面的问题多半出在这里. 现在已经建立得很完善而且容易使用的线性模型 (人们所熟知的混合 π 模型) 就是所提出的非线性模型的线性化方案. 本书也要介绍这种线性化的步骤.

结 构

本书试图把建立 BJT 模型方面的最新进展与已经建立的模型结合起来讨论, 通过这样的方法使读者可以利用现时流行中的大多数 (如果不是全部的话) 电路分析程序. 为此, 将对建立模型的两个方面问题进行讨论.

首先, 在本书的第二章, 从器件物理的角度来解释构成模型的各种效应, 以便使读者了解建立模型的假设条件及其局限性, 并获得处理他将遇到的不同符号的能力. 将从最简单的模型开始介绍, 最后再介绍建立最完善的模型.

建立模型的第二方面问题就是对器件各种参数的测量。在第三章中，将介绍通过终端测量而获得这些参数的各种方法。

符号及其确定原则

本书所用的模型参数及其符号是针对 SLIC^[1]（至 I 文本），SINC^[2]（至 D 文本）以及 SPICE^[3]（I 文本）这三种计算机程序来确定的，所有这些程序都可从加利福尼亚大学（伯克利）取得¹⁾。这些程序对本书来说是优良的工具，因为：（1）它们所使用的晶体管模型概括了从非常简单到非常完善的全部类型；（2）各种模型同器件物理具有强烈的相关性，因而只需提出简要的输入要求；（3）这些程序得到广泛的认可；（4）它们易于取得。

采用这些程序作为例子并不限制本书的适用性。所介绍的各种参数通常可以容易地转换到其他程序，在这些程序中应用了建立在 Ebers-Moll 模型^[4]（在直流及大信号、非线性情况时）、混合 π 模型^[5]（在小信号、线性情况时）基础上的各种模型，或者应用由使用者自行规定的模型。在附录六中列举了本书所介绍的 SLIC，SINC 以及 SPICE 的各种模型参数的相互对照。

1) 同 D. O. Pederson 教授联系，交付微小数目的处理费就能取得这些程序。联系地址为：美国，94720，加利福尼亚州，伯克利，加利福尼亚大学，电子学研究实验室（Electronic Research Laboratory, University of California at Berkeley, California, 94720, U. S. A.）。所有三种程序（SLIC，SINC 和 SPICE）均用 FORTRAN IV 写成，并适用于 CDC 6000 系列的计算机。适用于其他计算机的另外一些程序同样可以从其他学院取得。

输入参数和模型参数

一种程序要完整地规定一个晶体管模型所需要的三种类型信息,即:基本的物理常数、工作条件以及模型参数。只有最后一种信息才由使用者给以规定。

基本的物理常数,诸如波耳兹曼常数 k 以及电子电荷量 q 。通常,在程序里面就已给以规定。工作条件则规定了所用的模型方程所依据的环境条件。例如,在一个节点分析程序中,工作条件通常是指晶体管的偏置电压,即 V_{BE} 和 V_{BC} 。当用计算机迭代求解时,这些偏压系在程序内部确定的。就是说,程序先假设一组偏压值,然后据此来求解方程,在迭代过程中选择新的最佳的偏压值,直到收敛到一个合适的解为止。这些全是在内部完成的。本书中假设工作条件不仅包括偏压 V_{BE} 和 V_{BC} ,而且还包括所要完成的分析所处的温度 T 。通常要求将 T 的数值作为程序的输入量,所以假定在整个计算过程中, T 值均已确定。

电路中每一个不同器件所具有的一组模型参数,是所需要的第三种信息。这些模型参数的阐述和测量正是本书的主

题。作为模型参数的例子,有 β_F (在正向作用区中 $\beta_F = \frac{I_C}{I_B}$)

和 τ_F (在正向作用区中总的渡越时间)。模型参数的数值必须由使用者提供,在某种意义上说,即应由程序预先确定。某些程序是非常灵活的,允许间接地规定一些模型参数。例如,通常可以通过测量单位增益带宽 f_T 来确定 τ_F 。在 SLIC 和 SINC 程序中,使用者可以在某一偏置条件下,或者规定 τ_F 、或者规定 f_T 的数值。如果提供了 f_T 的信息,程序即可自行确定 τ_F 值,而且在确定过程中考虑了结电容、基区宽度调制

以及集电区欧姆电阻等效效应。这些在后面将要详细说明。需要指出,在这种特殊情况下, τ_F 为模型参数,而 f_T 则成为程序的输入量。因此,必须在模型参数与程序的输入参数之间加以区别。图 1.1 说明了这种区别。模型参数是指那些在模型方程式中使用的、用来描述在一组给定工作条件下的器件参数。至于输入参数则是为了通过程序规定模型参数所需要的各种数据。根据程序的不同,一部分或者全部输入参数可以就是模型参数。

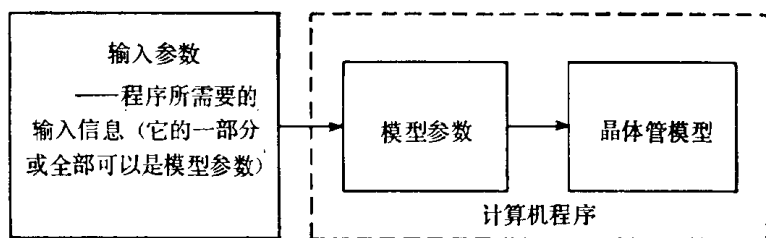


图 1.1 输入参数与模型参数之间的区别

初看起来,讨论模型参数与输入参数之间的形式区别有点学究气,但实际上却是非常重要的。它有助于人们理解它们之间的正确关系。在上述的例子中,将 τ_F 作为一个模型参数便突出了它的重要性。如果直接测量 τ_F (而不是通过 f_T 来确定),则不需要再去测量 f_T 了。在这里,测量 f_T 仅仅是作为确定 τ_F 的一种手段。

模型同器件物理之间的关系

一般说来,根据器件物理建立的模型有助于更透彻地理解模型,并可使用较少的输入参数和模型参数。例如,某些程序需要一个数值表来描述 β_F 随集电极电流的变化。然而,本

书所介绍的根据物理本质而建立的模型,只需要四个模型参数就能够在整个工作范围中完全确定 β_F 同 I_C 之间的关系.同时,在确定这四种参数的过程中,将可了解 β_F 随 I_C 变化的原因.因此,本书在讨论模型时将强调对器件物理本质的了解.

模型的符号

各种非线性模型都是以 Ebers-Moll 模型作为基础.原始的 Ebers-Moll 模型^[4]经过许多人的改进,已经成为包括各种效应特别是诸如电荷储存、 β 随电流的变化以及基区宽度调制等效应的模型.因此,对名词“改进的 Ebers-Moll 模型”存在着多种多样的理解.本书中对“改进”可按三种不同程度的复杂性来理解.各种模型的符号首先由 Pederson 提出^[6],它们如下:

EM₁ 表示原始的 Ebers-Moll 模型^[4],它仅仅是一种非线性直流模型;

EM₂ 表示第二级复杂程度的模型,它以 EM₁ 模型作为基础,构成包括非线性电荷储存效应以及欧姆电阻的一阶模型;

EM₃ 表示第三级复杂程度的模型,它包括了各种二阶效应,诸如基区宽度的调制、 β 及 τ_F 随电流的变化,更好地表示分布性的集电结电容,以及更精确地表示同温度的关系;

GP 表示 Gummel-Poon 模型,它在 SPICE 程序^[3]中得到使用.它同 Gummel 和 Poon 提出的积分电荷控制模型^[7]的主要区别在于所需的输入参数不同,以及在建立模型中不存在基区的伸展.就 EM₃ 和 GP 这两种模型中所包括的效应而言,这两种模

型基本上是等价的^[6]。

没有一种计算机程序用这种术语来描述模型；选用它主要是为了方便。例如，一种程序通常允许使用者既可规定 EM_1 中的若干参数，又可规定 EM_2 及 EM_3 中的若干参数。在所有的伯克利程序中，任何未由使用者规定的参数便是空缺值。如果对各种参数不予规定，则得到的模型就是 EM_1 模型。例如，如果不规定任何电容参数，则所有电容均为空缺值而等于零，而 EM_1 模型正是一种直流模型。

模型的选用

应当在满足分析的要求下，选用最简单的模型。这样，既易于建立模型，也节省计算机时间，而且所得到的结果也容易理解。例如，如果一个晶体管采用电流馈入，则外部基极电阻便无关紧要，因而也就不必去确定它的数值。

各种模型的用途可以归纳如下：

EM_1 模型：对一阶直流分析非常有用。

EM_2 模型：对于大多数用途（特别对数字电路）， EM_2 模型在精确度、建立模型的简易性、速度以及结果的可理解性方面具有良好的综合性能^[8]，它是最为常用的模型。

EM_3 和 GP 模型：只有在要求非常高的精确度时，才有必要采用这些模型。

第二章 各种模型的理论推导

2.1 引言

本章将对 BJT (双极型结型晶体管) 模型进行系统的理论推导, 其内容如下:

2.2 节 EM_1 模型

2.3 节 EM_2 模型

2.4 节 EM_3 模型

2.5 节 GP 模型

2.6 节 这些模型的局限性

在这些模型的推导中, 重点放在理解模型所包括的效应以及解释所需要的参数。至于测定这些参数的方法, 则留在第三章介绍。

2.2 EM_1 模型

EM_1 模型基本上是一种简单的非线性模型, 它由 Ebers 和 Moll 于 1954 年提出^[4]。它是一种直流模型, 在这种模型中, 不考虑器件中电荷储存特性。Ebers-Moll 模型适用于所有的工作区域, 即饱和区、反常作用区、正向作用区以及截止区。通过作用在不同结上的偏置电压, 可以对这四种区域给以定义, 如图 2.1 所示。在本节中将介绍完整地描述 EM_1 模型所需要的各种模型参数, 并对它们给以定义。这些参数是: β_F , β_R , I_S , T_{nom} 以及 E_g 。

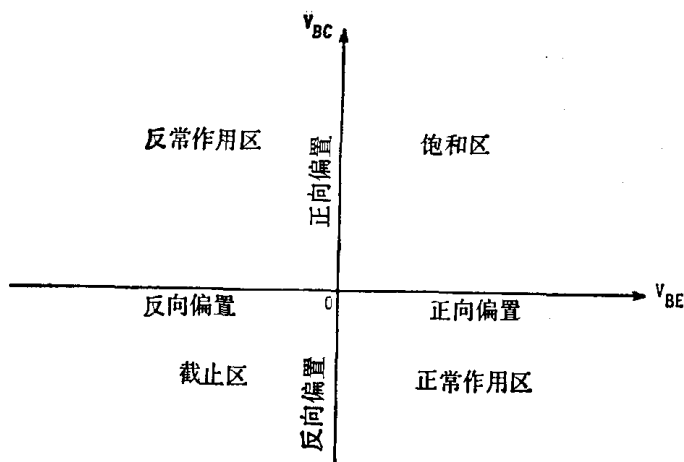


图 2.1 双极型晶体管的四种工作区域

实际上，所有的直流和大信号、非线性模型都是以 EM_1 模型作为基础。目前，有两种最流行的 EM_1 模型型式：注入型模型 [图 2.2(a)] 和传输型模型 [图 2.2(b)]。这两种模型都用来表示一个 npn 晶体管，从数学处理上看，它们也是等价的。至于为什么一种模型要比另一种更好，以及为什么任何时候都要致力于区别这两种模型，一开始是很难看清楚。然

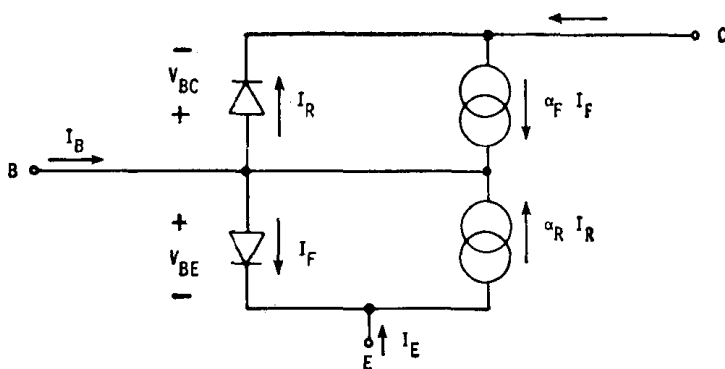


图 2.2(a) 注入型 EM_1 模型