

# 彩电 CAD 系统中大规模集成电路 宏模型的建模方法\*

武瑞恒 王予宏  
(天津大学电子工程系 天津 300072)

**摘要** 本文介绍了应用于彩电 CAD 系统中的大规模集成电路宏模型的建模方法,并指出这些方法的应用前景和发展方向。

**关键词** 集成电路, CAD 系统, 宏模型

## 1 引言

宏模型和宏模拟技术是对含有集成电路的大型网络或 LSI, VLSI 电路进行机辅分析和设计的重要手段。目前,宏模拟技术由于其显著的优越性而越来越受到国际上有关集成电路设计和生产的公司和厂家的重视,并且在宏模拟技术用于 CAD 系统方面做了大量的工作。

目前,作为集成电路发展的一个重要标志,多功能模块集成电路大量出现在电子产品中,大大提高了产品的整机性能和可靠性,降低了成本。将宏模型的概念和方法推广到多功能模块集成电路中是宏模拟技术的一个新的发展方向。目前已发表的有关宏模型的文献大多讨论一些单元集成电路(如运放等)的建模方法,而有关模块集成电路宏模型建立的文献,由于种种技术和商业上的原因则较少见到。本文介绍了应用于彩电 CAD 系统中的模块集成电路宏模型建立的基本方法及其特点,并简述了这些方法的应用前景和发展方向。这些方法同样适合于其他电子产品中的模块集成电路的建模工作。

## 2 模块集成电路宏模型的建模方法

### 2.1 功能块分割法<sup>[1-4]</sup>

功能块分割法是将原大型网络按其功能进行分割,形成相对独立的各个功能块单元电路。分块原则是以建立宏模型方便为准则,同时尽可能使参数测量容易进行。然后从这些功能块出发,在暂时避免各功能块之间相互影响的条件下,分块单独建立宏模型。最后从整体出发,考虑各功能块之间的相互作用,采用适当的联接方式(通常采用各种线性

1993-03-22 收到,1993-10-06 定稿

\* 七五科技攻关项目——彩电 CAD 系统开发

武瑞恒 男,1959年生,副教授,现从事电路 CAD, 集成电路宏模型和 SC 网络等科研和教学工作。

王予宏 男,1922年生,教授,现从事电路 CAD, 集成电路宏模型和网络理论等科研工作。

或非线性受控源)构成原网络的宏模型。由于多功能模块集成电路的结构日趋复杂,传统的简化法和构造法对整体建模已不适用,必须按照一定功能对电路进行分割。特别是当集成电路中各功能块之间联系和控制较少时,功能块分割法建模具有明显优点。例如对彩电集成电路 TA7698,按其功能可分为四个子块:视频放大、色预处理、色信号解码以及同步分离和行场扫描电路,并可利用上述方法进行建模。

功能块分割法的特点在于能充分利用已建立的典型电路宏模型,节省建模时间,并且为模块集成电路的建模提供了有效的分割方法和理论基础。利用该方法建模必须对内电路有充分的了解,并且建模过程和模型结构的复杂度取决于各功能块之间的联系和控制程度。

## 2.2 分段线性函数法<sup>[5-7]</sup>

网络的端口特性一般都可以用某个分段线性函数近似表示。分段线性函数法是在规范型分段线性函数及其宏模型的基础上,综合出分段线性函数的宏模型的。

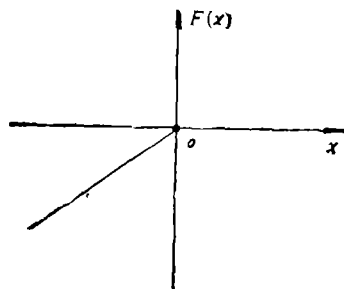


图1  $k > 0$  时的规范型分段线性函数曲线

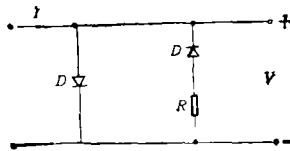


图2 规范型分段线性函数的宏模型

### 2.2.1 规范型分段线性函数及其宏模型

定义  $F(x)$  为规范型分段线性函数,  $F(x)$  满足:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \geq 0; \\ kx, & x < 0; \end{cases}$$

其中  $k$  为任意常数,可正可负,  $x = 0$  的点为一转折点。当  $k > 0$  时,如图1所示,  $F(x)$  是一分段线性函数。设某器件具有这种电流控制的电压特性,当电流  $I \geq 0$  时,这个器件上的电压为零;当电流  $I < 0$  时,电压与电流成线性关系。如果在 SPICE 程序的模型库中找到具有这种特性的器件,就可建立规范型分段线性函数的宏模型。

可以证明,如果对 SPICE 程序模型库中的二极管,选择模型参数为  $I_s = 10^{-22} \text{A}$ ,  $N \leq 10^{-7}$ ,其余参数均用 SPICE 程序定义的隐含值,则此二极管具有如图1所示的特性。因此规范型分段线性函数的宏模型可用图2所示电路来模拟。可知图2所示电路的特性为:

$$V = \begin{cases} 0, & I \geq 0; \\ RI, & I < 0. \end{cases}$$

### 2.2.2 分段线性函数的网络综合法

下面分析转移特性图的综合问题。图3所示为一分段线性函数,这个特性可分解为

几个分段线性函数的叠加,其中  $R_1, \dots, R_6$  分别为各线段的斜率. 相应的宏模型实现如图 4 所示, 其中  $E = V = V_1 + V_2 - V_3 - V_4 + V_5 - V_6$ .

以  $I$  为控制变量的转移特性图的分段线性网络综合的方法是, 把分段线性特性曲线分解为若干个分段函数, 建立每个分段函数的宏模型, 从而得到整个分段线性的网络综合宏模型.

对于  $V-I, V-V, I-I$  的特性图, 它们的分段线性特性的网络综合同上述方法类似, 不同的是用受控源把它变成电流控制的函数, 再进行网络综合. 策动点特性图的综合与转移特性图相似, 只需加一个受控源把输出端电压反馈回输入端, 就可完成其综合.

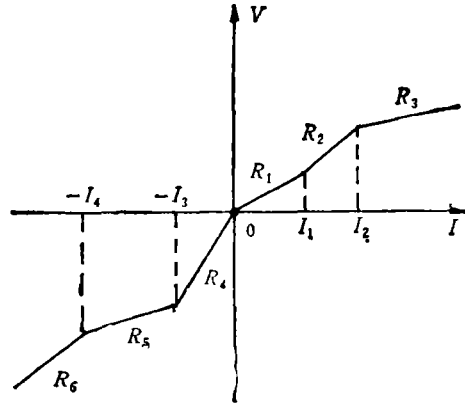


图 3 分段线性函数

分段线性函数法可以从模块集成电路的端口特性出发, 结构简单且便于计算机自动建模, 适于在 SPICE 上运行, 具有较强通用性. 所建宏模型的精度取决于模拟原电路端口特性的分段线性特性的精度

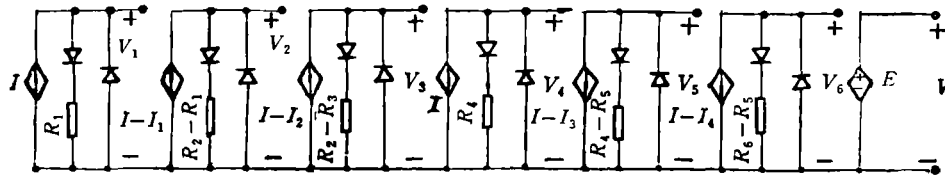


图 4 图 3 函数的宏模型

### 2.3 函数描述法<sup>[9-11]</sup>

函数描述法的基本思想就是通过直接或间接途径来实现用函数式模拟和表达电路性能的目的. 这种方法对模块集成电路中的几类电路进行函数描述建模的过程如下.

#### 2.3.1 线性电路

对于线性电路, 采用机辅分析可方便地求出其输入、输出阻抗和增益等参数, 然后用简单的函数关系和线性元件的组合即可建立其宏模型.

#### 2.3.2 非线性电路和控制电路

一般来讲, 对于建模中所遇到的实际电路, 通过机辅分析可得到其输出/输入转移特性或其它欲求的电路特性. 这些特性函数很可能是非线性的, 这样在建模时就会遇到一些问题, 因为 SPICE 所能分析的非线性受控源函数只有多项式一种. 对于这类问题的处理步骤是, 第一、确定待求特性函数中的变量关系并通过机辅分析求出一组以数据对为结果的函数关系; 第二、对所求得的结果进行分析和数据处理, 然后采用多项式最佳逼近的方法将这些结果拟合成多项式形式; 第三、将拟合得到的多项式函数用受控源的形式表现, 并以“相乘”或“相加”的方式参与整体电路功能.

集成电路大量采用了差分对电路,为了准确模拟差分特性以利于建模,在 SPICE 程序中增加了双曲正切函数受控源,使建模工作变得较为方便。

### 2.3.3 振荡器和数字开关电路

振荡器通常是具有正反馈特性的非线性放大电路。在 SPICE 程序中,正弦振荡的

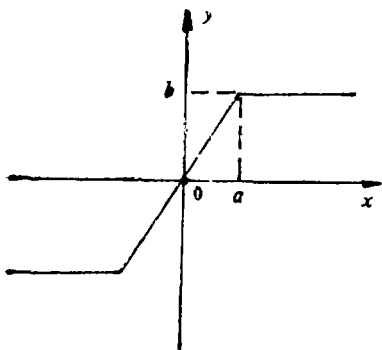


图 5 在 SPICE 程序上增加的奇对称函数

实现是很容易的,然而对于方波振荡,程序中的变步长迭代在方波陡峭的前后沿处将导致不收敛,因而实现较为困难。解决的方法是在 SPICE 程序中增加如图 5 所示的上升斜率可调、跳变幅度可变的奇对称函数,可得到不同形式的阶跃函数,从而可方便地实现方波振荡和数字电路功能。

函数描述法可以用简单而准确的数学表达式来代替或模拟原电路。所建模型较大程度上简化了原电路且精度较高。这种方法要有两个基础:第一、必须对一些电路特性曲线进行拟合,第二、需要对 SPICE 程序增加某些特殊函数和功能。

## 2.4 采用准阈值函数 q-TF 和准布尔量控制元件 q-BCE 的数-模混合电路的建模法<sup>[12-14]</sup>

这种方法是建立在文献[12, 13]提出的阈值函数 TF 和布尔量控制元件 BCE 基础之上的。其目的是采用更为有效的接口技术来实现数-模之间的转换。

### 2.4.1 阈值函数 TF 和准阈值函数 q-TF

文献[12]给出了阈值函数 TF 的定义:

一个开关的状态  $L_i$  是输入电压  $V_i$  和阈值电压  $V_T$  的函数:

$$L_i = \text{TF}(V_i, V_T),$$

且

$$L_i = \begin{cases} 0, & V_i < V_T; \\ 1, & V_i \geq V_T. \end{cases}$$

这个函数实际上是一个开关函数。由这个函数可以把一个连续的变量化为不连续的布尔量。文献[14]将这个函数加以推广:一条支路的开关状态由任意指定的两个节点或支路电压  $V_i, V_j$  的比较结果进行控制,即

$$L = \text{TF}(V_i, V_j),$$

且

$$L = \begin{cases} 0, & V_i < V_j; \\ 1, & V_i \geq V_j. \end{cases}$$

称  $L$  为准阈值函数 q-TF。

### 2.4.2 布尔量控制元件 BCE 和准布尔量控制元件 q-BCE

布尔量控制元件 BCE<sup>[12,13]</sup>: BCE 实际上是一种线性元件,其元件值受布尔量或布尔量的函数表达式的控制。

例如图 6(a) 所示是一个开关支路,  $L$  为一布尔量。图 6(b) 为它的宏模型,其中  $LG$  就是一个 BCE。图 6(b) 可以看作是一个电导支路,其电导值为  $G_D = LG$ , 受布尔量的控制。当  $L = 0$  时,开关打开,相当于此支路开路,其电导为零;当  $L = 1$  时,开关闭合,此

支路的电导值为  $G$ , 其节点导纳矩阵如下:

$$s \begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ \dots & LG \dots -LG \dots \\ \vdots & \vdots \\ \dots & -LG \dots & LG \dots \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} r$$

文献[12]给出的 BCE 类型只有电阻和直流电压, 文献[14]对此进行了推广, 使 BCE 也可以是布尔量控制的受控源, 这些电路模型的值都是 TF 或 q-TF 的函数, 并且是线性模型。

文献[14]引入了准布尔量  $L_q$  的概念:

$$L_q = \begin{cases} 1, & V_i \geq V_j; \\ -1, & V_i < V_j. \end{cases}$$

$L_q$  是由布尔量的代数运算得到的。由准布尔量控制的元件称为准布尔量控制元件, 即 q-BCE。

采用 BCE 和 q-BCE 可以建立起数-模混合电路的宏模型, 并且可以采用混合模拟算法<sup>[13,14]</sup>进行分析。这种算法的实质是通过 TF 和 q-TF 将连续量变为布尔量, 由布尔量的运算得到新的布尔量或准布尔量去控制 BCE 或 q-BCE。然后通过求解这种含有 BCE 或 q-BCE 的宏模型网络方程, 得到网络的解。由这些解又可以得到新的布尔量, 如此循环不已, 求得混合网络在一定时间内的解。

上述建模方法的特点是: (1) 可采用一般的电路分析方法, 如改进节点法进行电路分析; (2) 采用了 BCE 和 q-BCE 受控源, 避免了非线性迭代, 使计算速度大大提高。这种方法的缺点是不能用通用程序, 如 SPICE 来实现, 而必须自编程序。

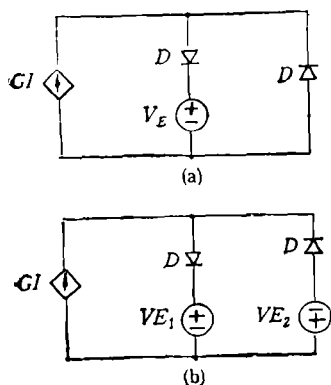


图 7 (a)  $L_i$  的宏模型  
(b)  $L_q$  的宏模型

$L_q$  在 SPICE 上的宏模型如图 7 (b) 所示。图中  $VE_1 = VE_2 = 1.00 \text{ V}$ ,  $GI = gm(V_i - V_j)$ ,  $L_q = V_o$ 。所有  $gm$  选取原则如下:

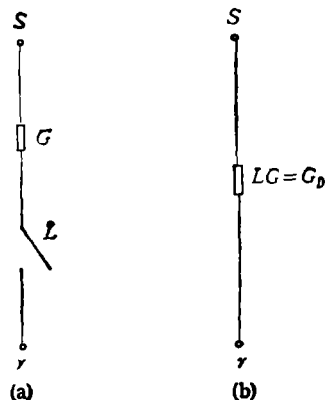


图 6  
(a) 开关支路 (b) (a) 的宏模型

### 2.5 控制变量法<sup>[15]</sup>

文献 [15] 在上述 BCE 和 q-BCE 方法基础上, 针对 BCE 和 q-BCE 不能被 SPICE 识别的缺陷, 提出了  $L_i$  和  $L_q$  在 SPICE 上的宏模型, 并且提出了控制变量建模法。

$L_i$  在 SPICE 上的宏模型如图 7(a) 所示, 其中  $GI = gm(V_i - V_T)$ ,  $V_E = 1.00 \text{ V}$ , 其输出电压  $V_o$ 。与  $L_i$  的关系如下:

$$L_i = V_o / V_E = V_o.$$

$$|GI| = 1.00 \sim 10.00 \text{mA}.$$

上述  $L_i$  和  $L_q$  宏模型具有较高精度, 为大规模集成电路的宏模型与 SPICE 相结合提供了可能.

### 2.5.1 控制变量法的几个基本概念

**控制变量** 在集成电路中决定其子块功能或工作状态的变量, 又称 CV.

**输入/输出变量** 在其取值范围内不引起子块功能或工作状态变化的变量, 又称 I/O 变量.

**第一类控制变量** 当前值决定子块的当前功能或工作状态的变量.

**第二类控制变量** 当前值向某一确定方向改变引起子块功能或工作状态的改变的控制变量.

**控制变量的规范型** 变量  $X$  是子块  $N_j$  的控制变量, 对应于  $N_j$  的功能  $f_i$ ,  $X$  有一定的取值范围  $D_i$ , 称  $D_i$  为  $X$  对应于  $N_j$  在  $f_i$  的定义域, 并且称  $\bar{X}$  为控制变量  $X$  的规范型, 如果子块  $N_j$  的控制变量  $X \in D_i$  时,  $\bar{X}$  取某一确定值  $\bar{X}_i$ , 即

$$\bar{X} \in \{\bar{X}_i, i = 1, 2, \dots, P\},$$

这里  $P$  为  $N_j$  的功能个数.

任一网络的变量均由控制变量或 I/O 变量组成, 在定义了 CV 和 I/O 变量后, 网络或功能块便可分割成多个子块. 由于将控制变量从相互作用的联系中区别出来, 使得各个子块之间的联系变得明显了.

### 2.5.2 控制变量规范型的宏模型实现

控制变量法建模是通过控制变量规范型的宏模型来实现的. 先来看一下第一类控制变量规范型的实现.

设控制变量  $V_i$  对子块  $N_A$  有如下作用:

$$F_A = \begin{cases} f_1, & V_i \geq V_T; \\ f_2, & V_i < V_T; \end{cases}$$

称  $V_T$  为  $V_i$  的起控点. 显然  $V_i$  是第一类控制变量. 根据定义, 其规范型  $\bar{V}_i$  有两个取值, 因此可用 TF 和 q-TF 来实现, 即:

$$\bar{V}_i = V_E \cdot \text{TF}(V_i, V_T) = \begin{cases} V_E, & V_i \geq V_T; \\ 0, & V_i < V_T; \end{cases}$$

或

$$\bar{V}_i = V_E L_q = \begin{cases} V_E, & V_i \geq V_T; \\ -V_E, & V_i < V_T; \end{cases}$$

其宏模型如图 7(a), 7(b) 所示. 采用 TF 的功能拟合如下式所示:

$$F_A = 1/V_E \cdot [f_1 \bar{V}_i + f_2 (V_E - \bar{V}_i)]$$

采用  $L_q$ , 则有

$$F_A = 1/(2V_E) \cdot [f_1 (\bar{V}_i + V_E) + f_2 (V_E - \bar{V}_i)].$$

由此可见, 将第一类 CV 转化为规范型后, 功能拟合就十分简单. 对于第二类 CV, 只要通过一定方法将其变为第一类 CV 及其规范型, 就可建立宏模型.

控制变量法所建模型包括三个部分: (1) 各功能子块的宏模型; (2) 将 CV 变换成规范型的宏模型; (3) 一些功能子块的联结部分。这种方法适合于多功能多状态电路的建模, 亦适合于数模混合电路的建模, 但其建模过程较为复杂。

### 2.6 传输模型法<sup>[16-18]</sup>

传输模型法是建立在对原集成电路进行功能块分割和端口特性构造法基础之上的, 但又与端口特性构造法具有本质不同。随着集成度的增加, 集成电路内部电路结构和控制关系日趋复杂, 仅靠端口特性很难建立其宏模型, 而且许多情况下端口特性本身就不全面。传输模型法虽然也利用并且模拟原网络的端口特性, 但不完全把网络看成“黑箱子”, 而是在功能块分割的基础上, 利用网络图论的方法, 通过对原网络进行分析, 在输入端口与输出端口(或输入节点与输出节点)之间找出与信号传输有关的全部传输路径; 这些路径必定包含一些代表电路传输特性、控制特性或路径之间联系的关键节点; 然后针对每一条路径, 不考虑其具体电路形式, 而用一组元件来模拟此路径的传输特性(如增益、相位等)和联系特性; 这样一组元件称为传输模型。可知这些传输模型是把输入节点、关键节点和输出节点联系起来的桥梁。全部传输模型就构成了整个功能块的宏模型。

传输模型法可以有效地、精确地建立较复杂网络的宏模型, 但必须在建模前对所需模拟的电路进行大量分析, 以获取建模所必需的参数。另外在 SPICE 上增加某些特殊函数将会使该方法更为实用。

## 3 应用前景和发展方向

以上是在彩电 CAD 系统开发中所研究和应用的大规模模块集成电路宏模型的建模方法, 用这些方法已经建立了彩电系列集成电路的宏模型, 这些模型能正确表征原电路的功能和端口特性, 且大大减少了元器件数目, 从而使 CPU 时间显著下降, 为外围电路的优化奠定了基础。很显然, 建立整机产品中的系列模块集成电路宏模型并建立模型库, 对于建立 CAD 系统, 提高产品机助分析和优化设计的水平, 加速产品更新换代的速度和能力, 提高产品的性能指标和实现国产化具有重要的经济价值和广阔的发展前景。

近年来宏模拟技术的发展动向是将集成电路宏模型与一定的通用电路模拟系统(如 SPICE)相结合<sup>[19-23]</sup>, 并向着建模自动化和设计系统化的方向发展。目前, 宏模型做为一个应用工具, 不仅需要系统完整的建模方法, 而且需要强有力的软、硬件环境和测试、验证手段。本文所叙述的多数建模方法是以在 SPICE 2G·6 基础上开发成功的彩电 CAD 系统软件为依托的, 具有较高推广价值。然而在建模自动化和系统化以及提高通用性和实用性方面还有待于进一步完善。今后的工作方向是: (1) 进一步研究高效、自动宏模型建模技术, 增强 CAD 系统的应用程度与适应能力; (2) 进一步开发宏模型的支撑环境, 开发各种模拟算法、接口技术和分析设计功能等, 简化模型结构并提高模型精度; (3) 进一步完善宏模型参数库、数据库和模型库; (4) 建立和完善宏模型技术所必需的测试和验证手段; (5) 作好宏模型与整机电路的整体配合和应用化工作, 提高宏模型技术的实用化水平。

## 参 考 文 献

- [1] Ruchli A E, *et al.* IEEE Trans. on CAS, 1982, CAS-29(3): 185—189.
- [2] Maston M D, *et al.* IEEE Trans. on CAD, 1986, CAD-5(10): 659—678.
- [3] Tsao D, *et al.* IEEE Trans. on CAD, 1986, CAD-5(10): 536—540.
- [4] 谭荣伟, 模块集成电路宏模型建立问题的研讨: [硕士论文]. 天津: 天津大学电子系, 1985年.
- [5] Van Bokhoven W M G. Macromodeling and Simulation of Mixed Analog-Digital Networks by a Piecewise-Linear System Approach. Proc. IEEE ICCG'80. New York: 1980, 361—365.
- [6] Rofail S S. IEEE Trans. on CAS, 1984, CAS-31(5): 500—503.
- [7] 徐 辉, 大规模集成电路宏模型建立方法及撕裂理论的研究: [硕士论文]. 天津: 天津大学电子系, 1988年.
- [8] Heylemann M H. Functional Macromodeling of Electrical Circuits. Proc. IEEE ISCAS'78. New York: 1978, 532—535.
- [9] Fisher G J, *et al.* IEEE Trans. on CAD, 1986, CAD-5(7): 429—432.
- [10] Garrett S J, *et al.* Macromodel of A Phase-Lock-Loop Integrated Circuit. Proc. IEEE ISCAS'79. Tokyo: 1979, 438—441.
- [11] 杜 今, 宏模型的FD建模法及其在彩电集成电路TA7598AP中的实现: [硕士论文]. 天津: 天津大学电子系, 1988年.
- [12] Arnout G, *et al.* IEEE J. of SC 1978, SC-13(6): 326—332.
- [13] Sangiovanni A L, *et al.* Circuit Simulation in Computer Design Aids for VLSI Circuits, In: Antognetti P, *et al.* Eds. The Netherlands, Sijthoff & Noordhoff: 1980, 19—112.
- [14] 卫学勤, 多功能块集成电路宏模型建模方法探讨及其程序实现: [硕士论文]. 天津: 天津大学电子系, 1987年.
- [15] 胡菊林, 多功能多状态 VLSI 建模理论及自举电路稳态加速技术的研究: [硕士论文]. 天津: 天津大学电子系, 1988年.
- [16] Hsieh H Y, *et al.* Macromodeling and Macrosimulation Techniques. Proc. IEEE ISCAS'78. New York: 1978, 335—339.
- [17] Glesner M. A New Efficient Circuit Approach for Macromodeling Digital Circuits. Proc. IEEE ISCAS'78. New York: 1978, 359—363.
- [18] 王子宏, 金 民. 电子学报, 1987, 15(2): 32—38.
- [19] Alexander M, *et al.* Electronic Design News, 1990, EDN-35(4): 143—154.
- [20] Hu C, *et al.* International Journal of Circuit Theory and Applications, 1990, 18(2): 189—203.
- [21] Sitkowski M. IEEE Circuits Devices Mag., 1991, 7(2): 5—11.
- [22] Golzio D, *et al.* International Journal of Circuit Theory and Applications, 1992, 20(1): 75—85.
- [23] Robinson M E, *et al.* Electronic Design News, 1993, EDN-38(1): 95—101.

## MODELING METHODS OF THE LARGE SCALE INTEGRATED CIRCUIT MACROMODEL IN COLOUR TV CAD SYSTEM

Wu Rutheng Wang Yuhong

(Department of Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** Macromodeling methods of large scale integrated circuits used in the colour TV CAD system are introduced. The prospects of application and the ways of development of these methods are discussed.

**Key words** Integrated circuit, CAD system, Macromodel