

双极模拟集成电路的参数统计性分析*

郝 跃

(西安电子科技大学,西安)

摘要 本文给出了实现双极模拟集成电路参数统计相关性分析的步骤和方法,提出了含对称参数分析的双参数(B_F, R_S)统计分析方法。实例分析和对比表明,该方法适于模拟集成电路的分析和设计。

关键词 模拟集成电路;参数统计分析;相关性分析

1. 引言

在集成电路生产过程中,环境和设备的影响使工艺参数产生随机起伏而引起电路参数发生变化,设计参数与生产参数之间存在偏差。集成电路的可靠性和生产的成品率往往与这种偏差有关。尤其对于模拟集成电路其偏差对性能的影响更为突出。很多由差分对构成的电路其性能不仅与芯片上器件参数的绝对值有关,而且还与元件间参数变化的相对值有关。因此,参数统计性分析对指导模拟电路的设计和和生产都是十分重要的。

从70年代以来,提出了很多集成电路参数的统计模型^[1-4]。这些模型共同的特点都是选择某种器件参数作为独立变量,利用相关性分析方法得到其它参数的统计模型。实践证明这种思想是可行的。但目前报道所选的独立参数都是如饱和电流 I_s ^[1],基极-发射极偏压 V_{be} ^[3]。这些参数虽然与其它参数有较强的相关性,但对这些参数进行优化设计对指导生产没有太大意义。这是由于这些参数在工艺过程中很难进行测试,而且参数的工艺可控性也较差。

本文从指导双极模拟集成电路设计和生产出发,提出了用参数(B_F, R_S)作为统计参数,并给出了参数统计分析过程以及统计模型的建立过程。最后,以电路实例分析,给出了该方法的统计结果。

2. 参数统计模型建立方法

由于很多模拟集成电路的性能由差分对管决定,对电路就应有两类需要统计和进行相关性分析的器件参数。第一类是不同晶体管和电阻等元器件在不同批次、同批次的不同硅片和同一硅片的不同位置参数变化规律的统计;第二类是对上述过程相邻器件相对变化量进行统计,最终得到参数相关统计模型。模型参数相关性分析通常有两个目的:(1)找出各参数之间的相关程度;(2)找到可作为表征其它参数统计变量(又称独立变量),并找到该变量与其它参数的统计模型。

参数之间相关程度可由相关系数构成的相关矩阵 R 表示。设统计模型参数为 $x =$

1989年8月14日收到,1990年6月9日修改定稿。

* 国家自然科学基金资助课题。

$\{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$. 进行统计的样品共有 N 个, 则

$$R = \begin{array}{c|cccc} & x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ \hline x_1 & 1 & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ x_2 & r_{21} & 1 & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ x_n & r_{n1} & r_{n2} & \cdots & 1 \end{array} \quad (1)$$

$$r_{ij} = r_{ji} = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N (x_i^K - \bar{x}_i)(x_j^K - \bar{x}_j) / S_i S_j \Big|_{i=1,2,\dots,n} \quad (2)$$

式中 $\bar{x}_i = E(x_i)$, $S_i = \sigma(x_i)$ 分别为 x_i 的平均值和标准偏差. 显然 $|r_{ij}| \leq 1$, 若 x_i 与 x_j 不相关 $r_{ij} = 0$; 若两个变量全相关, 则 $|r_{ij}| = 1$. 因此, 可以从 R 中得到不同参数的相关程度. 若从 n 个参数中得到 m ($m < n$) 个独立参数, 可用 m 个参数对其余 $n - m$ 个参数线性表示以构成参数的线性统计模型. 设被线性表示的某一模型参数为 y , $y = x_i, i = 1, 2, \dots, n - m$, 则线性表示为

$$y = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i, \quad x_i \text{ 为独立参数} \quad (3)$$

可以得到

$$\alpha = \bar{y} - \sum_{i=1}^m \beta_i \bar{x}_i \quad (4)$$

β_i 由下面方程决定

$$SB = Y \quad (5)$$

式中 $B = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m]^T$, $Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_m]^T$

$$Y_i = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N (x_i^K - \bar{x}_i)(y^K - \bar{y}), \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \cdots S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} \cdots S_{2m} \\ \vdots & \vdots \quad \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} \cdots S_{mm} \end{bmatrix}$$

$S_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N (x_i^K - \bar{x}_i)(x_j^K - \bar{x}_j) \Big|_{i=1,2,\dots,m}$. 由(4)、(5)式, 可以将任何一个模型参数通过相关矩阵得到(3)式的线性统计模型. 在对集成电路进行优化设计时, 只要确定了 x_j , 参数 y 就可以确定.

本文在对双极模拟集成电路分析基础上提出采用标准 n_{pn} 工艺的双极晶体管正向共射极电流放大系数 B_F 和基区扩散薄层电阻 R_S 作为独立变量. 其理由在于: (1) 统计分析表明 (B_F, R_S) 与其它模型参数具有较强的相关性. 如用某个参数很难全面反映其统计规律性; (2) (B_F, R_S) 有很好的工艺可控性, R_S 可指导基区扩散工艺, 而 B_F 可指导发射区扩散工艺; (3) (B_F, R_S) 容易测量, 在实际工艺中往往用这两个参数作为工艺规范值; (4) (B_F, R_S) 不仅可表征器件模型参数相关性, 而且可表征基区扩散电阻, 沟道

电阻等元件的相关性。虽然,由于基区杂质浓度使这两个参数也具有一定的相关性,但这两个参数由单独两步工艺控制,并且可以在统计分析时在协方差矩阵中考虑。这可使统计变量大为减少。因此,用 (B_F, R_S) 作为独立变量有较大的实用价值。

3. 统计分析过程和实例分析

以 XD1531 集成运算放大器为例^[1]给出参数统计分析结果。表 1 给出了参数的相关矩阵 R 。表中除 R_C (XD1531 第一级差分对负载电阻) 外其它都是 npn 管模型参数。 Δ 表示差分对的参数偏差。从矩阵中可看出,用 (B_F, R_S) 作为统计分析的独立参数是合适的。它们与其它模型参数有较强的相关性。利用(3)式得到其它参数与 (B_F, R_S) 的线性统计模型。例如

$$I_s = 1.83 + 0.064B_F + 0.094R_S (10^{-15}A)$$

$$r_{b'b} = 26.6 + 0.64B_F + 0.79R_S (\Omega)$$

将这些参数统计模型和 (B_F, R_S) 统计分布代入电路模拟程序。分别对该电路的开环电压增益 A_V 和 输入失调电压 V_{OS} 进行模拟,并与实测结果比较。其输出直方图如图 1 所示。从图中可以看出,两种电特性的测量与 Monte Carlo 方法模拟的分布特征相同;两种结果的分布中心值(均值)与偏差基本是一致的。这说明,用 (B_F, R_S) 构成的参数统计模型能满足双极模拟集成电路(尤其是标准 npn 工艺)分析和设计的要求。

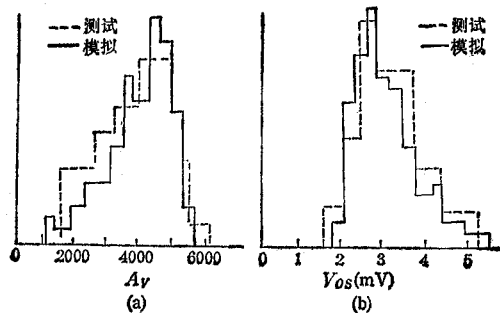


图 1 XD1531 结果比较
(a) A_V 直方图, (b) V_{OS} 直方图

4. 结论

本文提出的双极模拟集成电路双参数 (B_F, R_S) 统计分析方法能适应电路设计和工艺要求。对 (B_F, R_S) 优化设计的结果可直接指导电路生产。由于该方法是针对一般双极模拟集成电路,所以对含有 pn p、二极管和 JFET 的双极相容工艺仍然适用。

参 考 文 献

- [1] D. A. Divakar, *IEEE J. of SC*, SC-12(1977)10, 552—559.
- [2] P. Balaban, *IEEE Trans. on CAS*, CAS-22(1975)2, 100—108.
- [3] S. Inohira, *IEEE Trans. on CAD*, CAD-4(1985)4, 621—627.
- [4] J. Logan, *Bell Syst. Tech. J.*, 50(1971)4, 1105—1174.
- [5] 郝跃、姚立真等, *电子科学学报*, 10(1988)6, 501—506.

THE PARAMETER STATISTICAL ANALYSIS FOR BIPOLAR ANALOGOUS INTEGRATED CIRCUIT DESIGN

Hao Yue

(*Xidan University, Xi'an*)

Abstract The method and procedure for realizing parameter statistical correlation analysis of bipolar analogous integrated circuits are given, and a statistical method of double parameters (B_F , R_S) with some symmetrical parameters is suggested. Based on the comparison and analysis of the circuits, it is shown that the method can be used to analyse and design bipolar analogous integrated circuits.

Key words Analogous integrated circuit; Parameter statistical analysis; Correlation Analysis