

基于 GPM 的 PVT 电路快速仿真方法

殷树娟

(北京信息科技大学 理学院, 北京 100192)

摘 要: 本文针对 45 nm 及以下工艺节点中工艺角数目不断增多的情况, 利用高斯过程模型 GPM 的贝叶斯回归方法实现了一种基于 GPM 的 PVT 电路快速仿真方法, 该方法通过定义一组具有不同概率的备选函数族, 在自适应算法下通过尽可能少的仿真次数优化输出变量的不确定度, 快速找出电路设计的最坏情况, 直至满足设计要求, 从而解决了传统的多项式拟合建立 PVT 解析模型方法的精度问题, 能够在保证仿真精度的同时缩短仿真时间, 提高电路设计效率。

关键词: 工艺电压温度组合; 高斯过程模型; 工艺角; 最坏情况

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2017)12—0016—03

A New Fast PVT Simulation Method Based on GPM

YIN Shu-juan

(The College of Science, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 1001927, China)

Abstract: Gauss process model GPM has a rigorous statistical theoretical basis for dealing with Gao Weishu, small samples, nonlinear and other complex problems with good adaptability. With the increasing increment in technology of integrated circuits, the 45nm and the following process node have more and more process-voltage-temperature cases. A new PVT circuit fast simulation method is given in this paper using the Gauss process mode. The method by defining a set of alternatives with different probability functions can quickly find out the worst case circuit design to meet the design requirements. Then it can not only solve the problem of polynomial fitting accuracy of the traditional PVT analytical model method but also guarantee the simulation accuracy and shorten the simulation time and improve the efficiency of circuit design.

Key words: process voltage temperature; gauss processing model; corner; worst case

1 引言

为了在器件特性和环境条件出现各种波动的情况下验证电路的性能, 电路设计者常常需要在多个工艺电压温度 (PVT, Process Voltage Temperature) 组合下对电路进行仿真, 以找出电路在最坏情况 (Worst Case) 下对应的 PVT, 然后根据最坏情况下对应的 PVT 分析电路并进行改进使之能满足设计目标^[1]. 随着集成电路工艺的不断进步, 工艺特征尺寸不断缩小. 在 45 nm 及以下工艺节点, 工艺角 (corner) 数目不断增多, 从而使得 PVT 的组合也变

得更多. 如何通过尽可能少的仿真次数快速找出电路设计的最坏情况, 对减少电路仿真所需的时间, 缩短电路设计周期具有重要的意义^[2-4].

高斯过程模型 (Gauss Processing Model, GPM) 是近年来机器学习领域发展起来的一种贝叶斯回归方法, 它有着严格的统计学理论基础, 对处理高维数、小样本、非线性等复杂的问题具有很好的适应性. GPM 方法在国外发展很快, 并取得了许多研究及应用成果, 国内在机械控制等应用研究方面也有一些进展, 但用在电路仿真领域尚未见报道^[3]. 本文基于 GPM 提出了一种实现电路 PVT 快

速仿真的方法,能够在保证仿真精度的同时缩短仿真时间。

2 总体设计思路

现有的 PVT 仿真多采用如下两类方法进行:

(1)依据设计者的过往经验,选择可能对应最坏情况的 PVT 组合进行仿真.该方法过分依赖于设计者的经验,并且往往找出的 PVT 并不是真正的最坏情况(Worst Case).

(2)运用部分 PVT 的仿真结果,通过建立 PVT 组合的简单解析模型,验证模型并用它预测出余下 PVT 组合对应的输出值.这种方法是现阶段运用较多的方法,但大量的实验分析表明这种多项式拟合方法存在着一定的缺陷,尤其所讨论目标对象在非线程度非常高的情况下,拟合度难以准确逼近未知的函数,从而导致 PVT 分析结果不能满足要求,增加了电路设计失败的风险^[5-7].

本文将基于 GPM 来对 PVT 仿真做优化选择.该方法不是构建 1 个函数或 1 个曲线(面)来拟合已有的输入和输出参数集合,而是将预测值行为看成一次统计学估计,从而减少了 PVT 仿真的次数,大大节省了设计者的仿真时间,缩短芯片设计周期。

3 高斯过程(GPM)建模流程

高斯过程模型(GPM)不是构建 1 个函数或 1 个曲线(面)来拟合已有的输入和输出参数集合,而是定义了一个函数分布,赋予每一种可能的函数一个先验概率,可能性越大的函数,其先验概率越大.但是可能的函数往往为一个不可数集,即有无限个可能的函数,称为备选函数族;并认为在输入点上,备选函数族所对应的输出点服从正态分布.越临近备选集合点,输出变量的不确定程度越低,表现为方差越小,直到给定输入输出数据点上方差变为 0。

定义 N 为用于获取超参数的 PVT 组合数, C_N 为协方差矩阵,为 C_N 的行列式, t_N 为包含用于获取超参数的所有 PVT 组合对应的特征参数的向量, A 为常数, $P(D)$ 为证据因子,为 0 到 1 之间的常数, C_{ij} 为 C_N 的第 i 行第 j 列元素.其中, i 为 1 到 n 之间的整数, j 为 1 到 n 之间的整数,为第 i 个 PVT 组合对应的向量的第 k_1 个元素,为第 j 个 PVT 组合对应的向量的第 k_1 个元素, λ_i 为第 i 个超参数.根据两个或两个以上 PVT 组合及其对应的特征参数获取 GPM 中的超参数可以得到 GPM 输出数据符合联合正态分布:

$$P(t_{N+1} | t_N, \{x_N\}, x'_{N+1}, C_{N+1}) = \ln \left\{ \frac{1}{Z} \exp \left[-\frac{(t'_{N+1} - \mu_{t_{N+1}})^2}{2\sigma_{t_{N+1}}^2} \right] \right\} \quad (1)$$

式中, $Z = \sqrt{2\pi \frac{|C_{N+1}|}{|C_N|}}$, $\mu_{t_{N+1}} = k^T C_N^{-1} t_N$, $k = [C(x_1, x_{N+1}), C(x_2, x_{N+1}), \dots, C(x_N, x_{N+1})]$, $\sigma_{t_{N+1}}^2 = h - k^T C_N^{-1} k$, $h = C(x_{N+1}, x_{N+1})$. 当 $\sigma_{t_{N+1}}^2$ 近于 0 时所对应的 $\mu_{t_{N+1}}$ 即为 x_{N+1} 的预测值。

确定预测值后即可从协方差函数库中选择相应协方差函数,本文以平方指数函数(SE, Squared Exponential)为例,

$$C_{ij} = C(x_i, x_j) = \lambda_0^2 \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \frac{(x_i^{(k)} - x_j^{(k)})^2}{\lambda_i^2} \right] + \lambda_{N+1}^2 \quad (2)$$

式中, $x_i^{(k)}$ 为第 i 个 PVT 组合对应的向量的第 k_1 个元素, $x_j^{(k)}$ 为第 j 个 PVT 组合对应的向量的第 k_1 个元素, λ_i 为第 i 个超参数。

然后根据超参数分类公式

$$L = -\frac{1}{2} \ln |C_N| - \frac{1}{2} t_N^T C_N^{-1} t_N - \frac{N}{2} \ln(2\pi) + A + \ln P(D) \quad (3)$$

式中,计算 L 的最大值对应的超参数 λ 。

确定超参数后预测仿真精度是否满足电路设计要求,如满足精度要求则计算结果,如不满足需要可以重新选择协方差函数或设定超参数分布类型确定新的优化超参数直到满足设计精度要求.具体建模流程如图 1 所示。

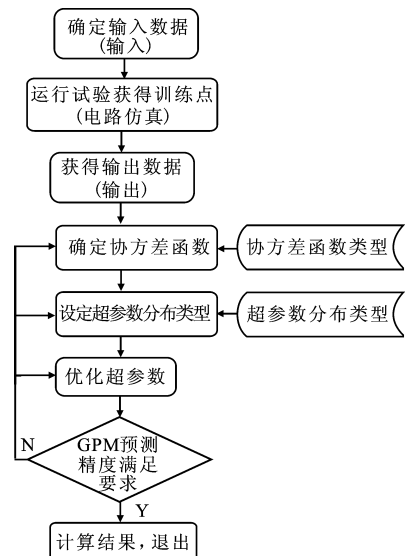


图 1 GPM 建模流程

4 基于 GPM 的 PVT 快速仿真方法

运用 GPM, 可以通过仿真部分 PVT 组合, 将它们的结果作为训练点, 通过 GPM 预测出剩下 PVT 组合的输出值, 从而减少了 PVT 仿真的次数, 大大节省了设计者的仿真时间^[8]. 如图 2 所示, 基于 GPM 的电路 PVT 快速仿真方法步骤具体如下.

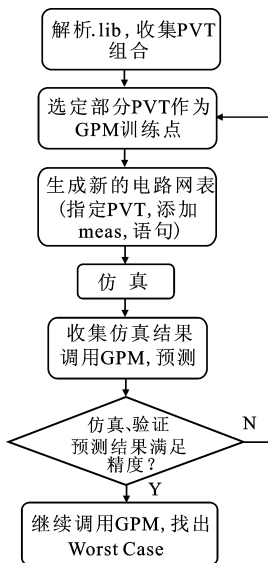


图 2 基于 GPM 的电路 PVT 快速仿真流程

(1) 解析 .lib(library 库) 文件, 收集 PVT 组合. 工艺的特征尺寸越小, 电路规模越复杂, PVT 的组合数将越多, 有的甚至已经达到 2 000 个以上.

(2) 选定部分 PVT 组合作为 GPM 训练点. 虽然 GPM 总能找出最坏情况对应的 PVT, 但是依据对所设计电路和器件的深入了解, 针对性的选出 PVT 组合作为训练点, 将提高 GPM 模型的精确度, 并减少后期 GPM 的校正迭代次数.

(3) 生成新的电路网表. 在该网表文件中, 指定步骤(2)中选择的 PVT 组合, 并添加测量(measure)语句输出希望的观测量.

(4) 运行电路仿真器做仿真.

(5) 收集仿真结果, 调用 GPM, 做预测.

(6) 验证 GPM 模型的精确度. 再次选择部分 PVT 组合, 运行电路仿真器做仿真, 通过比较仿真结果和 GPM 预测结果, 验证 GPM 模型的精确度.

(7) 如果 GPM 模型精度不满足要求, 将步骤(6)中选择的 PVT 组合作为新的训练点, 返回到步骤(2).

(8) 如果 GPM 模型精度满足要求, 运用 GPM 预测剩下 PVT 组合对应的输出值, 找出 Worst Case, 并退出.

5 结束语

本文针对 45 nm 及以下工艺节点中工艺角数目不断增多的情况, 利用高斯过程模型 GPM 的贝叶斯回归方法实现了一种基于 GPM 的 PVT 电路快速仿真方法. 该仿真方法包括两个主要部分: 根据设计指标要求选择部分 PVT 情况仿真并输出结果; 基于高斯过程模型通过尽可能少的仿真次数快速找出电路设计的最坏情况同时保证设计精度要求. 该 PVT 电路快速仿真方法不是构建 1 个函数或 1 个曲线(面)来拟合已有的输入和输出参数集合, 而是将预测值行为看成一次统计学估计, 从而解决了传统的多项式拟合建立 PVT 解析模型方法的精度问题, 能够在保证仿真精度的同时缩短仿真时间, 提高电路设计效率.

参考文献:

- [1] Newell D, Draper D, Remund Q, et al. GPM Microwave Imager (GMI) on-orbit performance and calibration results[M]. Italy, IGARSS Milan, 2015.
- [2] Farrar S, Jones L. GMI second stokes analysis using a nadir-look maneuver[M]. Orlando, USA, GPM Inter-satellite Microwave Working Group Meeting, 2015.
- [3] Draper D, Remund Q, Newell D. An assessment of radio frequency interference using the gpm microwave imager[M]. Italy, IGARSS Milan, 2015.
- [4] Liang Q, Mendel J M. Overcoming time-varying co-channel interference using type-2 fuzzy adaptive filters[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems, 2000, 47(12): 1419-1428.
- [5] Rakesh Kumar Palani, Ramesh Harjani. High linearity PVT tolerant 100MS/s rail-to-rail ADC driver with built-in sampler in 65nm CMOS[J]. Solid-State Circuits, 2015, 50(8): 1739-1740.
- [6] Sunday Olusanya Olatunji, Ali Selamat. An hybrid model through the fusion of sensitivity based linear learning method and type-2 fuzzy logic systems for modeling PVT properties of crude oil systems[C]//2011 Malaysian Conference in Software Engineering. Kuantan, Pahang, Malaysia, 2011.
- [7] Siliang Hua, Donghui Wang. A PVT-insensitive all digital CMOS time-to-digital converter based on looped delay-line with extension scheme[C]//2015 IEEE 11th International Conference on ASIC (ASICON). China, Chengdu, 2015.

(下转第 24 页)

表 1 典型测试结果

数据 图片	分辨率		线段总数	线段总 长度	平均 长度
图片 1	5 184 * 3 456	LSD	303	17 119.6	56.5
		本文算法	461	71 304.5	154.674
图片 2	3 264 * 2 448	LSD	1 524	55 135.7	36.2
		本文算法	1 688	97 998.9	58.1
图片 3	2 448 * 326 4	LSD	3 831	132 950	34.7
		本文算法	3 729	177 288	47.5

4 结束语

真实场景的高分辨率彩色图像由于噪声及色差对比度不高等原因,即使采用目前主流线段检测算法中性能最突出的 LSD 进行线段提取,也存在漏检率过高,长线段被过分割等问题. 本文算法充分利用高分辨率彩色图像的多通道、多尺度特点,在原始图像的多通道多尺度上多次应用 LSD 算法,并结合设计的后续鲁棒的线段筛选、融合算法,解决了上述问题. 若采用文中给出的经验参数,算法的内部参数可由输入图像的尺寸确定,故仍然保持了 LSD 无参数的优点. 通过对大量实拍图像进行实验对比,达到了良好的检测效果,降低了漏检率,明显改善了长线段过分段问题,为更进一步的高级计算机视觉处理提供了更完整可靠的低级视觉信息.

参考文献:

[1] Ballard D H. Generalising the hough transform to detect arbitrary shapes[J]. Recognition Pattern, 1981, 13(2):111-122.

[2] Chan T S , Yip R K. Line detection algorithm[C]// International Conference on Pattern Recognition. Beijing, China,IEEEExplore, 1996:126-130.

[3] Desolneux A, Moisan L, Morel J M. Meaningful alignments[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 40(1):7-23.

[4] Desolneux A, Moisan L, Morel J M. From gestalt theory to image analysis[M]. New York, Springer,2008.

[5] Grompone V G R, Jakubowicz J, Morel J M, et al. LSD: a fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 32(4):722-732.

[6] Akinlar C, Topal C. EDLines: A real-time line segment detector with a false detection control[J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(13):1633-1642.

[7] 李树全,房冬丽. 一种基于 Arnold 变换的彩色图像水印算法[J]. 微电子学与计算机,2017,34(1):53-57.

[8] Hamid N, Khan N. LSM: perceptually accurate line segment merging[J]. Journal of Electronic Imaging, 2016, 25(6): 61-62.

作者简介:

罗午阳 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为计算机视觉、图形图像处理、机载增强现实系统.
E-mail:luowy_avic@163. com.

程 岳 男,(1985-),博士. 高级工程师. 研究方向为图形图像处理、机载增强现实系统.

李亚晖 男,(1976-),博士. 研究员. 研究方向为嵌入式操作系统、计算机网络、信息安全.

文鹏程 男,(1981-),博士,高级工程师. 研究方向为计算机视觉、图形图像处理、模式识别、智能控制.

(上接第 18 页)

[8] Kanhu Charan, Ajit K Panda, Arti Noor, et al. Design of a humidity sensor with PVT variations using AMI C5 CMOS technology[J]. Microwave Magazine IEEE, 2008, 9(5):174-174.

作者简介:

殷树娟 女,(1981-),副教授. 研究方向为混合信号集成电路设计. E-mail:yinsj03@163. com.