

# 试验设计与仿真相结合构造集成 电路元模型的方法研究

游海龙, 贾新章, 张小波, 董 萍

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 集成电路的设计与优化常需要指标与参数简单、直接的模型, 即电路的元模型. 本文将试验设计与计算机仿真相结合构造集成电路的元模型. 讨论了构造元模型中使用的 4 种试验设计类型与 3 种模型. 结合低功耗集成运算放大器性能指标静态功耗元模型的构造, 分析比较了不同方法的各自特点. 从结果可以看出, 将拉丁超立方抽样与 Kriging 模型相结合最适合仿真试验中的电路元模型的构造.

**关键词:** 集成电路元模型; 试验设计; 拉丁超立方抽样; Kriging 模型

**中图分类号:** TN402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 06-1159-04

## Study on the Method of the Design of Experiment Integrated with Simulation for Constructing the Integrated Circuit Metamodel

YOU Hai-long, JIA Xin-zhang, ZHANG Xiao-bo, DONG Ping

(School of Microelectronics, Xidian University, Key Lab of Ministry of Education for Wide Band-Gap  
Semiconductor Materials and Devices, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** The design and optimization of integrated circuits (IC) often need the direct and simple relation of the parameters with specifications, called the IC metamodel. The method of design of experiment (DOE) integrated with computer simulation is used to construct the IC metamodel. The 4 experimental design types and 3 models that are applied in the construction of the metamodel are discussed. Through constructing the metamodel of static power that is the main specification of a Low-power integrated operational amplifier, it is found that the method of Latin hypercube sampling integrated with Kriging modeling can provide the most accurate approximation model based on the model error analysis.

**Key words:** integrated circuit metamodel; design of experiment; latin hypercube sampling; kriging modeling

## 1 引言

现代集成电路与器件的分析与优化设计, 基本依靠 EDA 仿真工具来完成. 为了提高电路优化设计的效率, 预测不同条件和参数下电路的性能指标, 以及在一定范围内进行性能优化常需要电路、器件参数与性能指标之间直接、简单的函数关系, 即电路与器件的元模型<sup>[1,2]</sup>; 另外对于复杂系统, 构造简单、直接的函数关系模型代替电学与物理原模型, 将简化问题、减少计算量以及真实物理试验成本等.

将试验设计技术 (DOE) 与仿真相结合是构造电路元模型的主要方法<sup>[3]</sup>. DOE 中的试验是采用“电路仿真”的方法进行的. 由于电路仿真试验具有与现实试验的不同特

点, 人们在传统试验设计基本理论基础上, 针对建立电路元模型的不同目的, 提出了一些新的抽样与建模方法用于仿真试验, 即所谓现代试验设计理论 (Modern Designs). 在抽样方法上, 出现最优化设计、以及常被称作充满空间设计 (Space Filling Design) 的拉丁超立方设计 (LHS)、均匀设计 (UNI) 等; 在建模方法上有神经网络模型<sup>[4]</sup>以及 Kriging 模型等.

本文将系统比较工程应用中常出现的几种 DOE 抽样类型以及建模方法在构造电路元模型中的作用, 并以构造低功耗集成运算放大器的主要性能指标静态功耗元模型为例分析不同 DOE 类型与建模方法的不同特点, 指出构造电路元模型的合适方法.

### 2 电路元模型的构造方法与模型检验

对于规模较大、结构比较复杂的电路和系统进行优化设计时,为了减少优化仿真成本,需要描述输出(性能指标)与输入(电路元件参数)直接函数关系的电路元模型。基于统计理论,DOE技术与仿真结合构造电路元模型的步骤如下:(1)确定元模型的适用范围,从而确定模型检验标准;(2)确定显著影响性能指标的参数以及参数的变化范围;(3)利用试验设计安排试验抽样,确定仿真试验方案;(4)按照试验方案进行电路仿真,采集数据;(5)根据建模的方法,分析数据,建立电路元模型;(6)依据检验标准,验证模型,如不符合要求,返回第二步,缩小参数范围,重新安排试验方案,改进模型。

构造电路元模型的目的通常是为了预测在某参数组合条件下电路性能指标值,即利用简单的元模型代替实际的电路物理结构模型。因此所构造的元模型应具有较好的预测能力。通常采用下式计算每组验证点的最大绝对误差MAX以及均方误差RMSE用于衡量模型的好坏<sup>[5]</sup>。

$$MAX = \max\{|y_i - \hat{y}_i|\}_{i=1, \dots, n}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n}$$

其中  $y_i$  为仿真值,  $\hat{y}_i$  为模型预测值,  $n$  为用于检验模型的预测点数;通过计算关心区域的MAX来评价模型对点的预测好坏,而RMSE用于评价模型对全局预测的好坏。一个好的模型应该具有较低的RMSE,同时MAX也较小。

### 3 试验设计与建模方法<sup>[6,7]</sup>

根据构造电路元模型的思路,需要解决以下问题:通过选取合适的试验设计对参数在关心的区域内进行抽样,确定仿真试验方案;通过选取合适建模方法对仿真试验采集到的数据进行分析,构造模型。本文将讨论比较4种试验设计类型(响应曲面设计、D最优化设计、拉丁超立方设计、均匀设计)、3种建模方法(多项式响应曲面、神经网络以及Kriging模型)对模型精度的影响。

#### 3.1 试验设计

本文讨论的4种设计,分别代表了试验设计方法的几种主要类型。Box-Behnken(B-B)响应曲面设计,是基于几何对称,由  $2^k$  要因与不完全区组设计组合而成。可以用于拟合二次模型。最优化设计是给定模型形式以及试验所有组合,利用计算机采用特定算法从候选的试验组合中选取使优化标准最优的试验组合的方法。D最优设计(D-opt)是最优化设计,即计算机辅助试验设计的一种。而均匀设计(UNI)与拉丁超立方设计(LHS)是现代试验设计理论中提出的一种“充满空间”抽样方法。均匀设计是由中国的方开泰与王元最早于1978提出。而拉丁超立方设计最早由McKay等(1979)专门为仿真试验提出的一种试验设计类型,在西方世界里,拉丁超立方设计广泛应用于仿真试验中。

### 3.2 建模方法

响应曲面模型最早被用于存在随机误差的实际试验的建模分析中,方法较为容易,但是对于高度非线性系统,该模型的精度常存在不足。神经网络模型不需要任何数学模型,它只根据输入数据与输出数据建立模型,因此适合仿真试验的建模分析,尤其对于非线性目标。本文采用广义回归的网络结构,具有较好的函数拟合能力。Kriging模型由D G Krige名字命名而来。它是一种方差估计最小的无偏估计的插值模型,对于具有确定输出结果的仿真试验,它常具有优于一般统计分析方法的预测能力。在文献[1, 2, 4]中看到,以上试验设计类型与建模方法都有不同程度的应用于建立电路元模型。本文将结合低功耗集成运算放大器的设计实例,利用上述试验设计与建模方法构造电路主要性能指标静态功耗的元模型,并比较分析各种方法组合的特点与优越性。

### 4 构造低功耗集成运算放大器的静态功耗元模型

集成运算放大器是电子系统的通用基本模块,是目前应用最广、产量最大的模拟集成电路。本文讨论集成运放功耗小于10mW,为低功耗集成运放。原理图如图1所示。

静态功耗是其主要指标,影响主要指标的参数及其范围如表1<sup>[8]</sup>。基于电路分析要求,需要建立静态功耗的元模型。

试验参数	变化范围
Q12BF	(10~50)
R8/kΩ	(0.6~3)
Q11Cje/Pf	(2~10)
Q12VA/V	(20~120)

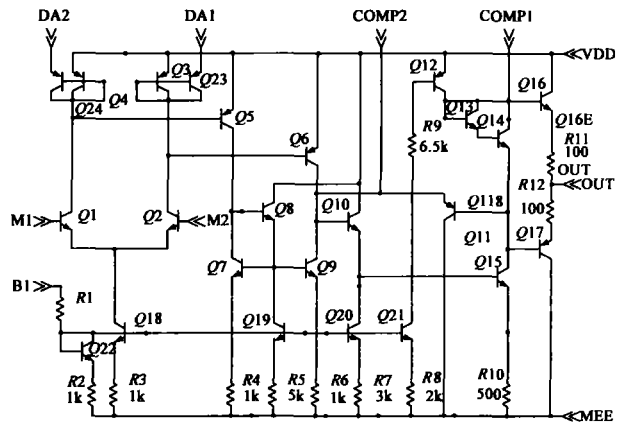


图1 低功耗集成运算放大器电路原理图

#### 4.1 仿真试验方案

在建立元模型中,确定各种试验设计方案时,选取的试验组合的规模以Box-Behnken响应曲面设计满足模型的二次项要求所需要的试验组合数为参考依据,其他试验设计的组合数与之相近<sup>[6]</sup>。根据不同的抽样类型(B-B, D-opt, UNI, LHS),对于四因素试验设计的试验组合数分别为27, 25, 24, 24。需额外非试验样本内的20组试验组合用于计算MAX以及RMSE,来评价模型的预测能力,从而

比较模型间的差异. 因此总共需要进行(27+ 25+ 24+ 20) 组仿真试验, 建立 4×3 个元模型.

### 4.2 结果与讨论

通过 96 轮仿真试验, 构造了静态功耗的 12 个不同模型. 并利用均匀抽样在试验空间内均匀抽取 20 组试验组合来检验模型, 得到 12 种组合下不同元模型精度的 MAX、RMSE 值, 如表 2 所示.

表 2 12 种模型预测误差值

	Max/mW			RMSE/mW		
	RSM	GNRR	Kriging	RSM	GNRR	Kriging
B-B	0.49	3.24	0.46	0.99	5.46	0.96
D-opt	0.59	2.23	0.69	1.01	4.56	1.46
UNI	1.09	1.93	0.89	1.27	4.34	1.57
LHS	0.33	1.56	0.33	0.61	3.36	0.57

根据模型的检验标准, 即 MAX、RMSE 越小模型越精确. 从以下几个方面进一步比较分析试验设计类型与建模方法对模型精度的影响: 不同试验设计类型的影响、不同建模方法的影响以及抽样方法与建模方法的交互影响.

#### 4.2.1 试验设计类型对模型精度的影响

为了分析试验设计类型对模型精度的影响, 将由同一设计类型得到的 3 个模型的预测 MAX 与 RMSE 求均值, 得到图 2. 可以看出均匀设计、拉丁超立方试验得到的模型具有较好的预测能力.

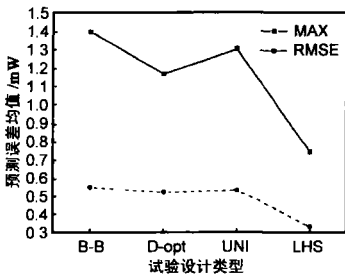


图 2 试验设计类型的平均 MAX 与 RMSE

#### 4.2.2 建模方法对模型精度的影响

为了分析建模方法对模型精度的影响, 将由同一建模方法得到的 4 个模型的预测 MAX 与 RMSE 求均值, 得到图 3. 可以看出对于所研究的问题二次响应曲面与 Kriging 方法都具有较好的预测能力, 相比较神经网络对于这种小规模抽样的预测能力有限.

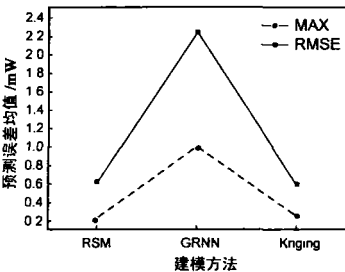


图 3 建模方法的平均 MAX 与 RMSE

#### 4.2.3 试验设计与建模方法的交互影响

从 4.2.2 节可知, GRNN 模型的精度相对较差. 因此这里只比较多项式响应曲面与 Kriging 模型与试验设计类型对精度影响. 从图 4 可以看出, LHS 抽样与 Kriging 建模方法结合得到的模型具有最好的模型精度. 而响应曲面方法对不同抽样类型更具有稳健性. 图 5 为基于拉丁超立方抽样, 静态功耗的 Kriging 模型的预测值与仿真值的比较

图. 可看出, 该方法得到的模型具有很好的模型预测能力.

从上述结果可

以看出, 与传统的响应曲面设计、最优化设计相比, 充满空间的均匀设计与拉丁超立方设计更适合基于仿真试验的元模型构造. 传统试验设计考虑试验的随机误差影响, 而这对于输出为确定值的电路仿真试验是没有意义的. 另外, 本文是在相近的试验规模下讨论不同设计类型与建模方法对模型的影响, 其实试验规模对模型也具有重要影响, 试验规模越大, 模型的精度可能越高. 对于本文探讨的 4 因素, 试验组合数为 25 左右的试验因为训练网络的规模存在不足, GRNN 神经网络没有反映出较好的模型预测能力, 说明相比之

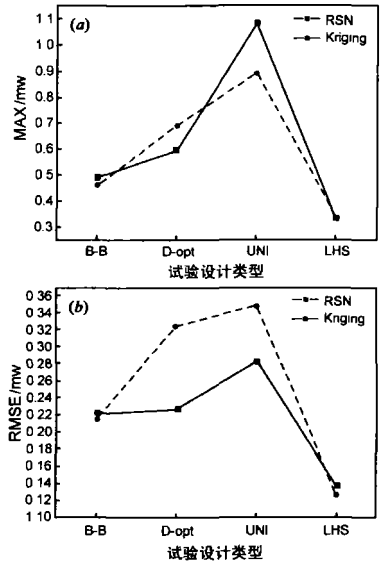


图 4 试验设计与建模方法对模型误差的交互影响:(a)MAX;(b)RMSE

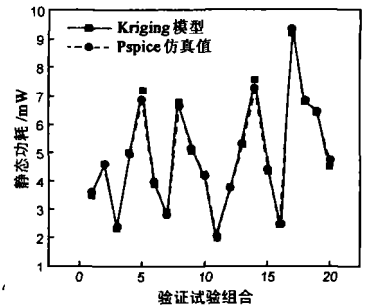


图 5 基于拉丁超立方设计的 Kriging 模型预测值与仿真值对比

下神经网络模型对试验规模具有较强的要求. 二次多项式回归建模, 对不同的试验设计类型具有较好的稳健性, 即受试验设计类型的影响较小, 能够提供较好精度的模型. 但是对于参数规模较大情况(例如大于 10), 多项式模型中包含项随着参数的数量指数增大, 这时利用响应曲面方法构造模型存在很大的难度. 同时, 试验设计类型与建模方法也需有较好的匹配, 构造电路元模型需要同时考虑抽样类型与建模方法, 从而选取最为合适的组合.

## 5 结论

本文分析和比较了 Box-Behnken 设计、D 最优设计、均匀设计与拉丁超立方 4 种试验设计类型以及多项式响应曲面、GRNN 神经网络以及 Kriging 3 种建模方法构造电路元模型不同的特点. 通过低功耗集成运放性能指标静态功耗元模型的构造, 指出在电路仿真试验中将拉丁超立方抽样与 Kriging 模型结合能够得到相对较好的模型精度. 该方法可以应用于集成电路器件以及工艺仿真试验的

## 元模型的构造.

## 参考文献:

- [1] 甘学温,冯小敏,肖志广,等. CMOS 电路参数的统计优化设计[J]. 电子学报, 1999, 27(4): 126- 128.  
Gan Xuewen, et al. The statistical optimizing design of CMOS IC parameter[J]. Acta eletronica Sinica, 1999, 27(4): 126- 128. (in Chinese)
- [2] Jim Carroll, Kai Chang. Statistical computer-aided design for microwave circuits[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1996, 44(1): 24- 32.
- [3] Jack P C Kleijnen. An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(16): 287- 300.
- [4] Zaabab A H, QiJun Zhang, Nakhla M. A Neural network modeling approach to circuit optimization and statistical design[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(6): 1349- 1358.
- [5] Timothy W simpson, Dennis K J Lin, et al. Sampling strategies for computer experiments: design and analysis [J]. Journal of International Journal of Reliability and Application, 2002, 2(3): 209- 240.
- [6] Montgomery Douglas C. Design and Analysis of Experiments[M]. New York: Wiley, 1997.
- [7] 方开泰. 试验均匀试验设计的理论、方法和应用——历史回顾[J]. 数理统计与管理, 2004, 23(3): 69- 80.
- [8] 王艳颖. 低功耗集成运算放大器的优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学研究生院, 2003.

## 作者简介:



游海龙 男, 1979 年生于湖北阳新, 西安电子科技大学微电子与固体电子学专业博士研究生. 研究方向为集成电路制造与设计中的统计表征、优化技术等. E-mail: youhailong@126.com



贾新章 男, 西安电子科技大学教授, 博士生导师. 目前从事集成电路 CAD 和优化设计、微电路可靠性分析和可靠性设计、生产过程控制(SPC、Cpk) 和工艺优化等方面的研究和教学工作.