

文章编号：1672-2892(2012)05-0555-04

## 均匀设计在微波效应实验研究中的应用

钟龙权，马弘舸

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要：**均匀实验设计是对微波效应研究现行的全面实验方法的改进，从实验参数空间中挑选有代表性的实验点进行实验，以减少实验所需样本量，降低实验成本。对低噪声放大器的微波效应实验进行两因素六水平的均匀设计，与同条件下的全面实验方法相比理论上节省 75% 的实验样本量。经仿真实验证明，采用均匀设计结合实验后数据处理，可达到与全面实验类似的效果，预测平均相对误差小于 5%。

**关键词：**均匀设计；微波效应实验；小样本；低噪声放大器

中图分类号：TN015

文献标识码：A

## Application of uniform design in microwave effects experiment

ZHONG Long-quan, MA Hong-ge

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** Uniform design is a method choosing parts of cross-sectional experiment from parameter space. Comparing with actual comprehensive test method, this improved method can decrease the sample size and cut the cost of test. Uniform design was used for making the test plan of microwave effects of Low Noise Amplifier(LNA), which contained two parameters and six values each. The sample size of uniform design was largely decreased by 75% compared to comprehensive test theoretically under the same condition. Simulation results indicate that, the combination of uniform design and succedent data processing can reach similar effect with comprehensive test, and the average comparative error of prediction is below 5%.

**Key words:** uniform design; microwave effects experiments; small sample size; Low Noise Amplifier

开展效应实验是研究微波效应的主要方法。由于效应实验常常是毁伤性的，实验后的效应物不能再使用；效应实验的对象又非常广泛，从价格低廉的基本电子元器件到昂贵的电子系统，所以效应实验成本很高，因此减少实验所需样本量和实验次数具有重要的现实意义。在微波效应的基础研究方面前人多是研究效应实验数据的分析、处理和预测，有概率论、模糊数学、模糊神经网络等方法，而对实验设计和方法的关注和研究则较少。

现行的效应实验研究仍采用全面实验的方法，即对效应实验参数的每个不同水平做相同次数的实验。虽然全面实验能够得到较多的数据，通过数据分析可以获得较为丰富的结果，结论也比较精确，但是全面实验耗时耗力，当要考察的参数较多，水平数更多时，则需要进行大量的实验，有时难以完成。例如考察一个数字集成电路的微波注入实验，对效应结果有影响的参数有微波频率、注入功率、脉冲宽度、脉冲重复频率和作用时间，如果每个因素考察 3 个水平值，则需要做  $3^5=243$  个水平组合的实验。效应实验往往要考察一定条件下的作用概率，若每个水平组合做 10 次实验，获得该微波参数条件下精确度为 0.1 的样本损伤概率<sup>[1]</sup>，则需要  $243 \times 10 = 2430$  次的实验。由于实验经费和时间的限制，实际的效应研究中只有较少的实验样本，比如混频器、低噪声放大器等单价较高的电子模块，更不可能进行如此大样本量的实验。因此效应实验通常只考察少数几个微波参数对实验结果的影响，这样不利于全面总结效应规律和理解效应机理。与全面实验相对应的是部分因子实验<sup>[2]</sup>，指从全面实验的水平组合中挑选有代表性的组合进行实验，并通过实验数据分析获得与全面实验相似的结论和效果。

本文主要介绍均匀设计这种效率最高、应用广泛的部分因子实验设计方法，然后应用均匀设计原理设计一个实际的微波效应实验方案。该方案在微波效应的多参数、多水平的组合中挑选有代表性的组合进行实验，与全面

实验相比大量减少了实验的组合数和样本数，从而应用较少的实验样本在一定程度上体现实验的趋势性规律，获取一定条件下的效应阈值，还可以为进一步的实验提供基础。

## 1 均匀设计原理

均匀设计法<sup>[2-6]</sup>是将数论方法与多元统计相结合而创立的、将实验点均匀地散布在实验范围内的一种新的实验设计方法，是数论方法中的“伪蒙特卡罗方法”的一个应用。现在流行的正交设计具有“均匀分散，整齐可比”的特点，而在均匀设计中只考虑实验点的“均匀分散”性，即让实验点均衡地分布在实验范围内，使每个实验点有充分的代表性。这样，均匀设计的实验点会比正交设计的实验点分布得更均匀，因而具有更好的代表性。和正交实验设计相比，均匀设计给实验者更多的选择，从而有可能用较少的实验次数获得期望的结果。均匀设计方法对于实验范围大、因素的水平数较多的复杂实验具有独特的优越性，实验的次数大为减少，也将大量减少实验的样本量，因此将其应用到高功率微波(High Power Microwave, HPM)效应实验设计中，将会在减少实验次数和样本量方面发挥重要的作用。

均匀设计的核心是合理地安排实验方案，减少实验的参数水平组合，达到用较少的实验次数找到较优因素水平组合的方法，正交设计和均匀设计都是通过构建表格来进行实验设计，均匀设计表常用符号  $U_n(q^s)$  表示，其中  $U$  是均匀表的代号， $n$  为实验次数， $q$  为因素的水平数， $s$  为列数，即最多可安排的因素数目。如  $U_7(7^6)$  表示要做 7 次实验，每个因素有 7 个水平，该表有 6 列，可用于不超过 6 个因素的实验设计， $U_7(7^6)$  均匀设计表如表 1 所示。

从表 1 所示的均匀设计表可以看出，均匀设计具有独特的实验布点方式：

- 1) 每个因素的每个水平做且仅做 1 次实验；
- 2) 任意 2 个因素的实验点分布在平面的格子点上，每行每列有且仅有 1 个实验点；
- 3) 均匀设计表中任意 2 列组成的实验方案并不等价，每个均匀设计表都有 1 个使用表；
- 4) 当因素的水平数增加时，实验按水平数的增加量而增加。

每个均匀设计表都附有 1 个使用表，表 2 为  $U_7(7^6)$  均匀设计表的使用表，它指示如何从设计表中选用适当的列。这样做的原因是：从均匀设计表  $U_n(q^s)$  中选出  $r$  列，则可能的选择有  $C_s^r$  种，但设计表中任意 2 列组成的实验方案一般并不等价，不同列组合起来所代表的点集的均匀性也不同，根据使用表设计得到的实验点均匀性最好。因此，均匀设计需严格按照使用表安排实验。

## 2 效应实验的均匀设计过程

以某型号低噪声放大器(LNA)模块的微波注入实验为例，说明均匀设计的过程和在效应实验研究中应用的注意事项<sup>[7]</sup>。

1) 确定因素及水平，挑选实验中可能影响指标的因素。根据效应实验研究实际，可能影响指标的因素较多；实验中选取注入功率、脉冲宽度、重复频率 3 个可变参数，将微波频率固定为 2.1 GHz，注入时间固定为 1 s。3 个可变参数中，脉冲宽度、重复频率列入均匀设计范围，而注入功率因为在不同的脉宽与重频组合条件下差异较大，不宜统一对功率水平进行分配，所以用人工控制，以 0.5 dBmW(0.5 dBmW 来源于前期的摸底实验)为步进增加，进行多个功率水平的实验，从而得到跨越从 0~1 整个区间的样本损伤概率。

2) 选水平，根据实验目的和以往经验确定合适的参数水平。参考水平在现阶段高功率微波源容易实现的参数范围(脉宽为 20 ns~100 ns，重频 100 Hz 以下)内取的水平数相对较多，实验中涉及的微波参数及其水平见表 3。

表 1  $U_7(7^6)$  均匀设计表

Table1 Uniform design table of  $U_7(7^6)$

test number	row number					
	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
2	2	4	6	1	3	5
3	3	6	2	5	1	4
4	4	1	5	2	6	3
5	5	3	1	6	4	2
6	6	5	4	3	2	1
7	7	7	7	7	7	7

表 2  $U_7(7^6)$  使用表

Table2 Use table of  $U_7(7^6)$

parameter number	row number					
	2	1	3	3	6	6
3	1	2	3			
4	1	2	3			
5	1	2	3	4	6	6
6	1	2	3	4	5	6

表3 某低噪声放大器实验参数及水平  
Table3 Test parameters and levels of a kind of LNA

No.	microwave pulse parameter	level number						level number
		1	2	3	4	5	6	
1	frequency/GHz			2.1				1
2	pulse width/ns	20	50	100	200	500	1 000	6
3	pulse repetition frequency/Hz	single	20	100	200	500	1 000	6
4	power/dBmW	different with parameter combination, at step of 0.5 dBmW					several	
5	pulse duration/s					1		1

3) 选均匀设计表, 根据因素和水平数从有关文献选取1个合适的均匀设计表。均匀设计表只有奇数表, 偶数表则选择多1个水平的奇数表, 去掉表中的最后1行即得。根据确定的脉宽、重频的水平数, 选取表1所示的 $U_7(7^6)$ 均匀设计表, 去掉最后1行即可得到适宜于实验应用的 $U_6(6^6)$ 表, 其使用表不变。

4) 制定设计方案, 从均匀表的使用表中选出列号, 将因素分别安排在这些列号上, 并将因素的各水平值按所在列的编号分别对号添入, 编制出实验方案。此处根据使用表1选择表2中的1,3列的前6行进行设计, 得到如图1(a)所示的实验点分布。而根据以往效应实验的经验, 微波参数高水平组合对实验结果影响较大, 条件允许时应当进行考察, 因此用水平轮转法进行水平调整, 调整后的实验点分布如图1(b)所示, 其中菱形所在的实验点为补充实验点, 用于后续数据分析方法预测结果的验证。

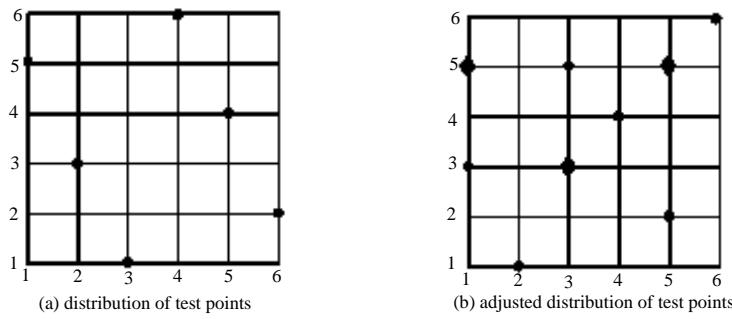


Fig.1 Distribution of test points of uniform design test plan

图1 均匀设计实验方案实验点分布图

将表2中LNA效应实验的参数及水平对应到图1(b)所示的均匀设计实验点中, 得到的最终LNA实验方案的微波参数如表4所示, 后3个实验点为补充实验。实验时的顺序按实验号随机抽取。

表4 均匀设计实验方案  
Table4 Experiment scheme of uniform design

No.	microwave pulse parameters			
	frequency/GHz	pulse width/ns	pulse repetition frequency/Hz	pulse duration/s
1		100	single	
2		20	20	
3		500	100	
4		200	200	
5	2.1	50	500	1
6		1 000	1 000	
7		500	single	
8		500	500	
9		100	100	

采用均匀设计对微波效应实验参数及水平进行选取, 可大量减少参数水平的组合数, 即减少实验所需次数和样本数。以此次两因素六水平的实验为例, 若进行全面实验, 需进行 $6 \times 6 = 36$ 个水平组合, 而均匀设计仅需6个水平组合和少量(3个)补充实验, 所需的实验水平组合减少约75%, 即只在全面实验的水平组合中挑选了1/4的参数水平组合进行实验, 从理论上讲节省的实验次数和样本量相当可观。后期开展了均匀设计实验方案的验证性实验, 并对实验数据进行偏最小二乘回归分析和预测<sup>[8-9]</sup>, 与补充实验数据进行比较得出平均预测误差小于5%。验证了进行小样本量的基于均匀设计的实验设计, 加上偏最小二乘数据分析, 可以得到与全面实验类似的结论和效果。

### 3 结论

应用均匀设计原理对LNA模块的微波效应实验参数和水平组合进行了选取, 获得了两因素六水平的微波效应实验方案。与全面实验相比, 该均匀设计实验方案节省了75%的水平组合数, 实验次数和所需样本量大量减少。

充分说明均匀设计减少所需的实验次数和样本量的有效性。从另一角度讲在较少实验样本量的条件下，采用均匀设计方法可以进行更多参数及水平的实验，并通过后续数据分析及预测可以得到和全面实验类似的结论和效果。

#### 参考文献：

- [ 1 ] 李科,马弘舸,周海京. 微波效应试验最小样本量估计分析[J]. 强激光与粒子束, 2009,21(4):541–544. (LI Ke,MA Hongge,ZHOU Haijing. Estimating analysis of least sample of microwave effects experiment[J]. High power laser and particle beams, 2009,21(4):541–544.)
  - [ 2 ] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:科学出版社, 2001. (FANG Kaitai,MA Changxing. The orthogonal and uniform experimental design[M]. Beijing:Science Press, 2001.)
  - [ 3 ] 张卫. 化学实验数据的统计处理与计算[M]. 北京:化学工业出版社, 2010. (ZHANG Wei. Statistical processing and calculation of chemical experiment data[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2010.)
  - [ 4 ] Fang K T,Lin D K J,Winker P,et al. Uniform design:Theory and Applications[J]. Technometrics, 2000,42(3):237–248.
  - [ 5 ] Li R. Model selection for analysis of uniform design and computer experiment[J]. International Journal of reliability,Quality and Safety Engineering, 2002,9(4):305–315.
  - [ 6 ] 张良霞. 均匀设计在生存资料抽样调查中的应用研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2009. (ZHANG Genxia. The study of the application of uniform design in sample survey about survival data[D]. Nanjing:Nanjing university of information science&technology, 2009.)
  - [ 7 ] 周启明,杨蓉,黄聪顺. 九芯电缆 EMP 耦合的电流注入法实验[J]. 信息与电子工程, 2004,2(1):49–53. (ZHOU Qiming,YANG Rong,HUANG Congshun. Testing of EMP coupling with current injection for nine-core cable[J]. Information and Electronic Engineering, 2004,2(1):49–53.)
  - [ 8 ] 李世玲. 基于 PLS 成分的变量筛选法[J]. 信息与电子工程, 2003,1(2):31–35. (LI Shiling. The variable selection based on PLS component[J]. Information and Electronic Engineering, 2003,1(2):31–35.)
  - [ 9 ] 钟龙权,马弘舸. 偏最小二乘回归在微波效应预测中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(5):1324–1328. (ZHONG Longquan,MA Hongge. Application of partial least-square regression to prediction of microwave effects[J]. High power laser and particle beams, 2011,23(5):1324–1328.)

### 作者简介：



钟龙权(1985-),男,四川省德阳市人,硕士,从事高功率微波效应研究.email:lorne216@163.com.

马弘舸(1973-),男,四川省绵阳市人,博士,研究员,研究方向为瞬态电磁脉冲学、超宽带技术、高功率微波与天线技术研究。

## 重 要 声 明

作者论文提交《信息与电子工程》期刊发表，一经录用，论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《信息与电子工程》期刊编辑部。

《信息与电子工程》已加入《中国科技论文统计源期刊》、《中国学术期刊(光盘版)综合评价数据库(CAJCED)》、《中文科技期刊(光盘版)数据库》、《中国期刊(光盘版)全文数据库(CJFD)》、《中国核心期刊(遴选)数据库》、万方数据—数字化期刊群(网)、中国期刊网、中文科技期刊网、91阅读网以及《电子科技文摘》。本刊同时被美国《乌利希期刊指南》(Ulrich's Periodicals Directory)和波兰《哥白尼索引》(Index of Copernicus)收录。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬。如作者不同意将文章编入以上数据库,请在来稿时特别声明,本刊将另做处理。

《信息与电子工程》编辑部  
2012年10月25日