

# 美军标 MIL-STD-883K 中噪声容限测试方法的适用性研究

菅端端 刘芳 钟明珠

(中国电子技术标准化研究院 北京 100176)

**摘要:** 提出了美军标 MIL-STD-883K 噪声容限测试方法在使用中的一些问题。基于对业界所用噪声容限测试方法的分析,比较了各种方法间的区别和优缺点,分析了美军标中噪声容限测试方法很少修订却长期存在的原因。通过对相关标准和测试方法的梳理,明确了美军标及其他噪声容限测试方法的适用范围,提出了我国相应标准制修订方向的建议。测试结果表明,最大乘积法和动态最大等边法在较大的范围内都适用,可以在我国相应标准中加以采用。

**关键词:** 噪声容限;最大等边法;最大乘积法;动态最大等边法

**中图分类号:** TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1035

## Study on the applicability of test method of noise margin in U. S. military standard MIL-STD-883K

Jian Duanduan Liu Fang Zhong Mingchen

(China Electronics Standardization Institute, Beijing 100176, China)

**Abstract:** This paper presents some problems of noise margin test method in the MIL-STD-883K use. Based on the analysis of the noise margin test methods used in the industry, the differences, advantages and disadvantages of the methods are compared. Analyzing the reason why noise margin test in the standard method is rarely revised, the paper proposes the applicability of the noise margin test methods in MIL-STD-883K and the industry, and revision directions for four corresponding standards in China. The test results show that maximum product criteria and dynamic maximum equal criteria are applicable in a wide range, and can be used in the corresponding standards in China.

**Keywords:** noise margin; maximum equal criteria; maximum product criteria; dynamic maximum equal criteria

### 1 引言

美军标 MIL-STD-883《微电子器件试验方法标准》(原名《微电子器件试验方法和程序》),从1968年问世以来,对微电子器件可靠性的提高起着重要的作用。该标准中的试验方法已从初版的48项增至今天的116项,内容涉及微电子器件的来料检查和验收、设计确认和控制、工艺规范和计量、筛选、鉴定和质量一致性检验等各个领域。我国军标中的基础标准之一 GJB548 就是参照 MIL-STD-883 进行制定的, GJB548-1988 参照 1983 年 MIL-STD-883C 版, GJB548A-1996 参照 1991 年 MIL-STD-883D 版本<sup>[1]</sup>, 现行 GJB548B-2005 参照的是 MIL-STD-883F 版,而正在修订中的 GJB548C-20XX 是以 MIL-STD-883 的 J 版本为蓝本,可见 MIL-STD-883 对我国标准的制定有着深远影响,深入研究其相关内容对于指导自主标准的制定有着重要意义。我

国现行的 GJB548B<sup>[2]</sup>并没有包含 MIL-STD-883F 的全部内容,如 MIL-STD-883 中 3000 和 4000 系列的方法就没有被引入国军标,这其中就包含本文提到的噪声容限测试方法。

现行 MIL-STD-883K 中方法 3013.1“用于数字微电子器件的噪声容限测量”在 20 世纪 70 年代的 MIL-STD-883A 版本中就有记载,具体出现年代由于时代久远已经无法考证,到目前为止只在 1974 年 11 月 15 日修改了一次,也就是说此方法使用了 42 年未再进行修改。

我国标准方面,GB/T 17574-1998 中第 III 篇第 1 节的 13.2 提到了噪声容限测试方法的相关内容,但只是作为补充资料出现,并且只提供了简单的公式定义,并没有对测试所需的输入、负载条件等内容做详细规定,可操作性较差,与之形成对比的是 MIL-STD-883K 中方法 3013.1 不但将噪声容限的测试方法分为动态测试和静态测试,还将电源、地对输出信号的干扰测试以及详细的实现方案引入其中,

对于实际测试具有一定的指导意义。尽管如此,企业日常检测中也很少采用此方法,而是使用一些更易操作,适用范围更广的方法,如“负斜率法”<sup>[3]</sup>、“双稳态法”、“最大等边法”、“最大乘积法”、“动态负斜率法”、“动态最大等边法”等。噪声容限的概念在数字逻辑电路的设计和应用中很重要,噪声容限的测试方法作为一种基础理论在国外早期的文献中讨论较多,而且国外的很多教科书也对噪声容限的测试方法进行了说明,但看似简单的一个概念,在测试方法上似乎存在着很多分歧,产业界、教科书中较多使用的方法和标准中的相关内容都存在一些差异。

本文研究的目的是通过调研噪声容限测试方法在 MIL-STD-883 中出现的年代,制修订情况和修改内容,借助对测试方法的实践进一步明确此方法的作用;比较 MIL-STD-883J 中方法和企业所使用方法间的异同,探索我国标准基于 MIL-STD-883 修订的新方向;寻找微电路更新换代快而美军标噪声容限测试方法却长期适用的原因以及早期改版的原因;通过对噪声容限测试方法的理论研究和应用情况,明确测试中需要注意的事项。

## 2 噪声容限测试方法适用性分析

### 2.1 美军标中的噪声容限测试方法

噪声容限是描述数字电路中噪声的一个重要参数<sup>[4]</sup>,噪声容限是一个广义的概念,根据干扰信号的种类可分为稳态噪声容限(static noise margin, SNM)和瞬态噪声容限(dynamic noise margin, DNM),根据输入端的不同可分为高/低电平噪声容限,电源噪声容限和地噪声容限。在美军标 MIL-STD-883K 中对噪声容限的定义:“在保证输出逻辑电平不偏离允许值的前提下,可以代数施加到无噪声最差输入(包括信号输入和电源/地输入)电平上的外部信号电压幅值。”初看这个定义,会令人感到疑惑。

1)什么是“最差输入电平”并没有明确,仅是考虑工艺偏差导致的输入电平差异还是温度、寿命等其它因素都要考虑。

2)由于实际物理环境中非理想因素较多,即使是对同一个器件,在相同的电压、温度、湿度等外部环境中,按照定义,多次测量得到的噪声容限值也有可能不同。数字电路本身增益很高,传输曲线斜率很大,这种现象就更加明显,对于同种器件多次测量结果如何取舍,标准中也并未明确。

3)对于噪声容限这种涉及多次测量寻找极值的参数,一般会用统计的方法加以测量,但标准中并未指出置信区间,样本个数等相关参数,使得该标准在实际操作过程中会产生分歧。

4)标准中并未指明输入电平的种类。输出信号的偏离归根到底是能产生偏离效果的能量的累积,所以相同时间内,能产生偏离效果能量累积多的波形,输出导致偏离的可能性就大。比如脉宽为 1 ps,幅值为电源电压的窄脉冲,如果频率足够低,是不能使输出电平偏离允许值的,原因是它

的幅度虽高,但并没有足够的时间累积,也就是说使输出发生偏离的能量不够,所以,单纯的以幅值来定义噪声容限而不明确输入波形会令标准使用者感到困惑。

标准 MIL-STD-883K 对稳态噪声容限的测试方法可总结为对于一个反相器,当输入电压( $V_{in}$ )小于等于最大输入低电平( $V_{il}$ )时,可得输出电压( $V_{out}$ )大于等于最小输出高电平( $V_{oh}$ )。当输入电压( $V_{in}$ )大于等于最小输入高电平( $V_{ih}$ )时,可得输出电压( $V_{out}$ )小于等于最大输出低电平( $V_{ol}$ ),且  $V_{ih} > V_{il}$ ,那么,高电平噪声容限( $V_{nh}$ )和低电平噪声容限( $V_{nl}$ )可以分别定义为:

$$V_{nh} = V_{oh} - V_{ih} \quad (1)$$

$$V_{nl} = V_{il} - V_{ol} \quad (2)$$

对于反向器来说,通常  $V_{il}, V_{ih}, V_{ol}, V_{oh}$  这 4 个参数的关系如下:

$$V_{ol} < V_{il} < V_{ih} < V_{oh} \quad (3)$$

图 1 所示为理想情况下反相器的传输特性,网格区域以外的区域为反相器工作的区域,随着温度的变化,工艺的偏差和电源的影响,任一种型号芯片内所有反相器的传输特性都会形成一簇曲线,指定  $V_{oh}$  时对应的这簇曲线中最低的输入低电平  $V_{il}$  决定了这种芯片的最差噪声容限  $V_{nl}$  (曲线 A),指定  $V_{ol}$  时对应的最高的输入高电平  $V_{ih}$  决定了这种芯片的最差噪声容限  $V_{nh}$  (曲线 B),如图 1 中点状区域所示。由于噪声是施加到芯片中每个逻辑门的,任何一个功能逻辑门的错误都会导致整个芯片功能的错误,所以,一颗芯片甚至一种型号芯片的噪声容限都是以最差结果为准的,也就是说要找到噪声容限最差的那个逻辑门作为整颗或整个型号芯片的噪声容限,而这一点在动辄百万、千万门量级的大规模集成电路中是很难实现的。

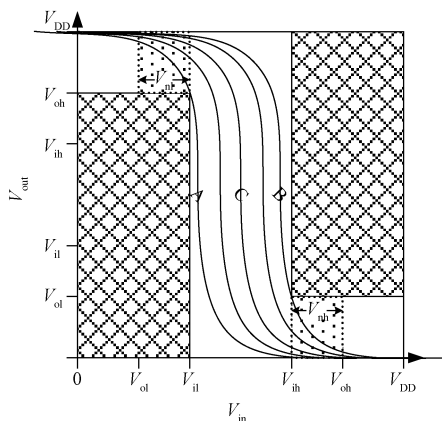


图 1 美军标中噪声容限测试方法

以上对噪声容限的分析是根据 MIL-STD-883K 标准中对噪声容限的定义而展开的,其中经常提到的一个词是“电平允许值”,从标准中可以看出,测试噪声容限的前提是首先得到这个“电平允许值”,那么,这个值通常是多少呢。经过翻阅多个产品的详细规范,发现详细规范中规定的

$V_{ol}$ 、 $V_{oh}$ 、 $V_{il}$ 、 $V_{ih}$ 通常有以下几种,如表1所示。

表1 常见详细规范中对数字电路输出电平的规定

名称	典型值		
$V_{ih}$	$0.7 * V_{DD\_IO}$	$0.7 * V_{DD\_IO}$	$0.8 * V_{DD\_IO}$
$V_{il}$	$0.3 * V_{DD\_IO}$	$0.3 * V_{DD\_IO}$	$0.2 * V_{DD\_IO}$
$V_{oh}$	$0.8 * V_{DD\_IO}$	$0.9 * V_{DD\_IO}$	$0.9 * V_{DD\_IO}$
$V_{ol}$	$0.2 * V_{DD\_IO}$	$0.1 * V_{DD\_IO}$	$0.1 * V_{DD\_IO}$

从表1可以看出,这4个值的取值只保留了一位小数,且不同产品的取值很多都相同,可见详细规范中的值只是一个规定值,并不是测试值,所以也就不能用来计算噪声容限。从图1的分析中可以看到, $V_{oh}$ 和 $V_{ol}$ 的规定决定了噪声容限的最终测试结果,那么 $V_{oh}$ 和 $V_{ol}$ 的选择就很重要,但是,实际应用中只要晶体管可以认为是低的输入电平就可以当作输入低电平,人为的规定电平的高低意义并不大,所以,根据人为规定得出的噪声容限在实际应用中也并没有太多意义,而且在很多应用中更多关心的是噪声容限的相对幅值,对于 $V_{oh}$ 、 $V_{ol}$ 、 $V_{ih}$ 、 $V_{il}$ 的准确值并不太在乎。所以,业界采用的噪声容限测试方法与MIL-STD-883K中方法3013.1规定的测试方法有较大区别,下节将对业界常用噪声容限测试方法进行分析。

美军标中分别对稳态信号电平噪声容限、电源/地噪声容限、瞬态噪声容限的定义和测试方法进行了规定,但都如对噪声容限的定义一样,有很多令人质疑的地方,甚至有些地方出现笔误和自相矛盾的情况。这种情况也发生在MIL-STD-883K中其他制定较早、修订较少的方法中。基于此种情况,我方与美军方负责修订美军标MIL-STD-883的机构——美国国防后勤局(DLA)的相关人员进行了交流,部分双方都认可的错误在MIL-STD-883K的第二次改版中进行了修订,也包括噪声容限相关方法3013.1中的一个错误。这是美军标噪声容限测试方法时隔42年后的又一次改版。这说明此方法被业界较少采用,关注度很低,而我国军标是参照美军标的,出于国际上标准对标等诸多因素的考虑,又有引入相应方法的必要,那对于这类制定时间久远,似乎已经落伍的标准如何处理就引起了很多的讨论。目前,刚完成修订的GJB548 C版(草稿)仍沿用B版本的处理方式,不对MIL-STD-883J中3000和4000系列方法进行引入,但争论似乎并没有平息,未来我国标准对此类方法的处理方式也没有明确,所以,本文对噪声容限测试方法的发展历史进行了梳理,并对现有主流测量噪声容限的方式进行了研究,期望通过比较MIL-STD-883K中方法和企业所使用方法间的异同,寻找微电路更新换代快而美军标噪声容限测试方法却长期适用的原因,进而探究我国标准中噪声容限方法基于MIL-STD-883修订的新方向。

## 2.2 噪声容限测试方法的演进

最早对噪声容限测试方法以及噪声容限与逻辑门传输

特性关系进行详细讨论的公开发表的文献是Hill<sup>[5-6]</sup>在1967、1968年发表的两篇文章,文中对噪声容限和噪声抗干扰技术进行了深入研究。Hill文章发布十年后,陆续出现了多篇讨论噪声容限的文献<sup>[7-9]</sup>,这些文献的作者们提出了不同的测试噪声容限的方法,并建议了多种定义噪声容限的标准<sup>[10]</sup>。到1983年,LOHSTROH发表一篇文章在一定程度上消除了噪声容限的定义分歧,他证明了多数新出现的噪声容限定义都是等效的,但是他的研究成果被同时代的研究人员所忽视,并没有被引入当时的教科书。到了20世纪90年代,大多数字电路设计的书籍都采用“单位增益定义”作为噪声容限的定义,但这种方法在实际使用中并不太适用<sup>[11-12]</sup>,于此同时,教科书中更多关注的是稳态噪声容限的定义,而很少关注瞬态噪声容限。

### 2.2.1 负斜率法

负斜率法(negative slope criteria, NSC)和下节将要讨论的双稳态法是20世纪80~90年代教科书中最常用的两种噪声容限测试方法。负斜率法的特点是可以透过传输特性曲线直接测量出 $V_{il}$ 、 $V_{ih}$ 、 $V_{ol}$ 、 $V_{oh}$ ,对于没有详细规范指定 $V_{oh}$ 、 $V_{ol}$ 的情况下比较实用。负斜率法测试噪声容限的方法如图2所示,当得到数字门级链路的输入输出传输特征曲线后,在曲线上找到斜率为-1的两个点,这两个点分别对应一个横坐标和一个纵坐标共四个点,横坐标中较小的为 $V_{il}$ ,较大的为 $V_{ih}$ ,纵坐标中较小的为 $V_{ol}$ ,较大的为 $V_{oh}$ ,根据式(1)、(2)就可以计算噪声容限。

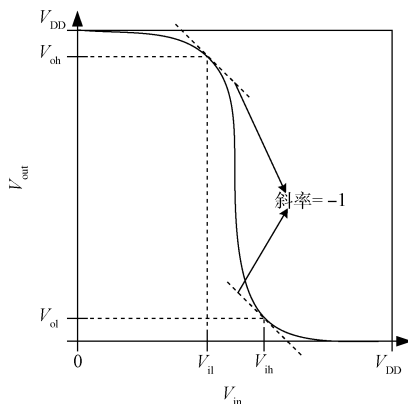


图2 负斜率法测试反相器噪声容限的原理

利用负斜率法测试噪声容限是基于两个假设:

- 1) 无限长逻辑门串的传输特性可以等效为一个寄存器,这个假设的合理性已经在文献[13]中进行了说明,如果噪声无法令寄存器误翻转,也就不能让无限长逻辑门误翻。
- 2) 所有奇数门的传输特性都相同,所有偶数门的传输特性都相同,对于同为奇数或偶数的门来说,噪声对其影响方式和干扰结果都是基本一致的,所以,此假设也是合理的。

基于这两个假设,可以对两个首尾相接形成环路的反相器解两个电压节点的方程,从而可以发现当临界点的斜

率为-1时,  $V_{nl} + V_{nh}$ 最大,此为 NSC 的理论基础。

### 2.2.2 双稳态法

双稳态法(bistable state criteria, BSC)是在负斜率法的基础上发展而来的。负斜率法简单易操作,但它成立的基础是  $V_{nl}$  与  $V_{nh}$  的和最大化,而并不是高低噪声容限都最大,这会引入很多歧义。如果传输特性曲线上有两个以上的-1斜率点,会形成  $V_{nl} + V_{nh}$ 相等,但  $V_{nl}$ 、 $V_{nh}$ 各自不相等的多套噪声容限值,使得测试结果不唯一,这使得 20 世纪 80~90 年代很多教科书不使用负斜率法,而选择双稳态法作为噪声容限的测试方法。双稳态法与负斜率不同之处在于  $V_{oh}$ 、 $V_{ol}$  定义的方式,双稳态法使用传输特性与其镜像曲线交点中两个稳态工作点的纵坐标定义  $V_{oh}$  和  $V_{ol}$ ,如图 3 所示。

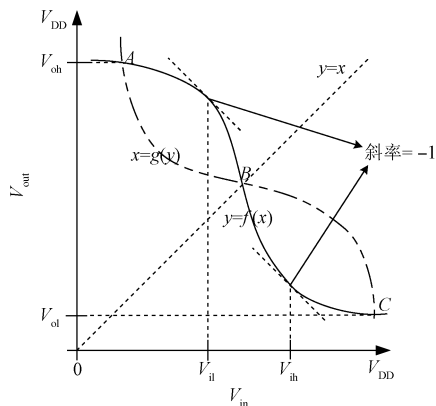


图 3 双稳态法噪声容限测试原理

虽然双稳态法被很多评价很高的数字电路教科书采用,但双稳态法被提出之后就饱受争议,因为 BSC 法缺少理论支撑,而且由于双稳态法对  $V_{oh}$  和  $V_{ol}$  的约束很紧,很多有效的传输特性曲线不满足其要求,与图 1 所示标准的定义方式也有冲突,不能定义满足要求的一簇传输特性曲线<sup>[5]</sup>,所以,双稳态法的广泛使用受到限制。

### 2.2.3 最大等边法

负斜率和双稳态测试法都是针对典型传输特性曲线的,对于特殊的传输特性曲线这两种方法有可能会失效。如图 3 所示,对于级联的逻辑门来说电路发生误翻转的原因是外部噪声使得奇数级或偶数级逻辑门的特征曲线发生偏移,使得传输特性曲线在最初 1/2 象限中保持电路稳定工作的交点消失,电路的某个电压节点跳过  $y=x$  的直线,跳到另一 1/2 象限的曲线交点工作。

为了保证特殊情况下噪声容限测试方法的有效性,文献[10]提出了两种通过传输特性曲线和其反函数曲线所形成的图形定义噪声容限的方法。如图 4 所示,曲线 I 是反相器的传输特性曲线,曲线 II 是曲线 I 的反函数。在第一象限直线  $y=x$  上下各形成一个由曲线 I 和曲线 II 围成的眼状区域,在此两区域内分别画两个正方形,令这两个正方

形的一个顶点在曲线 I,同时,正方形的对角顶点落在曲线 II,在所有满足以上条件的正方形中找到面积最大的两个为 S1 和 S2,在直线  $y=x$  以上的正方形为 S1,以下的为 S2,正方形 S1 的  $x$  方向的边长为低电平噪声容限( $V_{nl}$ ), $y$  方向的边长为高电平噪声容限( $V_{nh}$ ),此方法称为最大等边法(MEC),其中,  $V_{nl} = V_{nh}$ 。

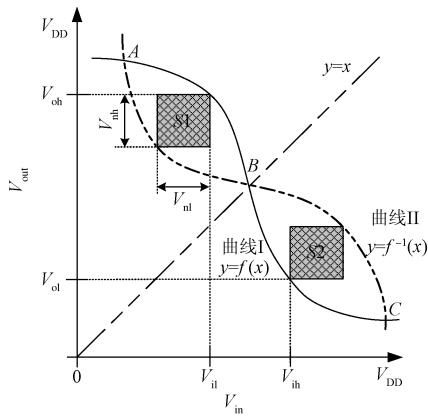


图 4 最大等边法噪声容限测试原理

### 2.2.4 最大乘法法

将最大等边法中的正方形替换为面积最大的矩形,就构成了最大乘法法(MPC)。对于接近对称的传输特性曲线,最大等边法和最大乘法法测得的结果基本一致。与双稳态法不同,最大等边法和最大乘法法如果采用负斜率法相似的方法进行推导,可以得到与负斜率法相似的结论,可见最大等边法和最大乘法法在理论上也是成立的。

### 2.2.5 动态负斜率法

以上几种噪声容限的测试方法都是基于直流测量的,产生的问题是对噪声容限的估计比较悲观,因为绝大多数的数字电路是在不停翻转的,且引入的噪声也是以瞬态,即窄脉冲的方式对电路施加干扰的,这种窄脉冲对逻辑门的直流输出影响较小,即便是输入噪声的幅度超过了稳态噪声容限,也有可能经过几级逻辑门将窄脉冲滤除,从而消除这种瞬态噪声对电路逻辑正确性的影响,过于悲观的估计会在设计中牺牲电路面积、速度和功耗性能。文献[14-16]提出了动态噪声容限的测试方法,在动态噪声容限中不仅考虑幅度,同时还要考虑噪声的脉冲宽度以及负载对噪声容限的影响。

建立如图 5 所示的测试电路,脉冲源提供两种测试波形,一种是 V1 端所示的“凹波形”,高电平为电源电压,调整输入脉冲,不断降低“凹波形”的低电平( $V_{in}$ ),可以在 V2 点得到一个低电平为地电平,高电平不断上升的窄脉冲,选择此窄脉冲的峰值为输出电压  $V_{out}$ 。通过绘制  $V_{in}$  和  $V_{out}$  的关系图可以得到在指定脉宽“d”和负载“ $C_{load}$ ”下的右侧反相器的“凹波形”传输特性曲线。另一种波形是虚线所示的“凸波形”,此波形的低电平为地电平,高电平为不断上升的

$V_{in}$ , 在 V2 点可以得到高电平为电源电压, 低电平为不断下降的输出电压  $V_{out}$ , 绘制此两输入输出电压的关系图可以得到在指定脉宽“ $d$ ”和负载“ $C_{load}$ ”下的反相器“凸波形”传输特性曲线, 如图 6 所示。定义“凸波形”上半平面 -1 斜率点的横坐标为  $V_{ih}$ , 纵坐标为  $V_{oh}$ , “凹波形”下半平面 -1 斜率点的横坐标为  $V_{il}$ , 纵坐标为  $V_{ol}$ ,  $V_{nl} = V_{il} - V_{ol}$ ,  $V_{nh} = V_{oh} - V_{ih}$ 。此曲线是在一定的负载电容  $C_{load}$  和一定的脉宽  $d$  下测得的, 用动态负斜率法测得的噪声容限是会随着输入施加波形脉宽的变化而变化的, 如图 7 所示, 为被测电路加恒定的 20 fF 负载电容, 不断改变测试电路的输入脉宽  $d$  为 50、100、200 ps, 可以看到当噪声脉宽变大时, “凸曲线”和“凹曲线”的间距随之变小。因为脉宽越宽, 脉冲波形越接近直流, 也就越靠近“直流”曲线。

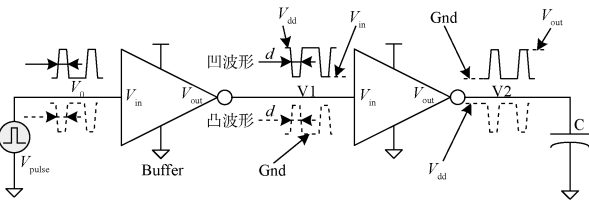


图 5 动态负斜率法噪声容限测试原理

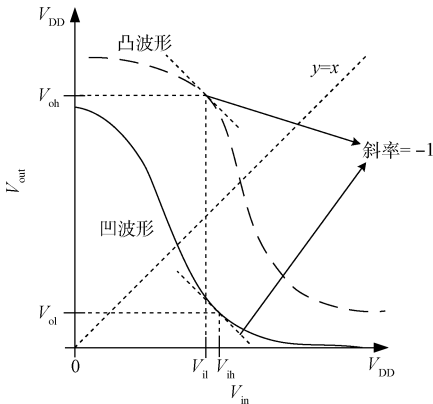


图 6 动态负斜率法噪声容限测试传输特性曲线

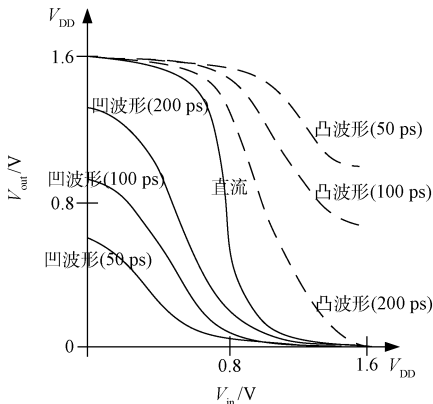


图 7 动态负斜率法噪声容限随脉宽变化

### 2.2.6 动态最大等边法

使用动态负斜率法相同的测试电路可以将最大等边法引入进行动态噪声容限的测试, 即动态最大等边法 (DMEC), 与最大等边法不同的是动态最大等边法是在反相器“凸曲线”和“凹曲线”间寻找面积最大的正方形以确定高/低电平噪声容限 ( $V_{nh}/V_{nl}$ )。相比动态负斜率法, 动态最大等边法的适用范围更广。如图 8 所示, “凸波形”和“凹波形”间最大正方形 S1 的边长为噪声容限的测试值。

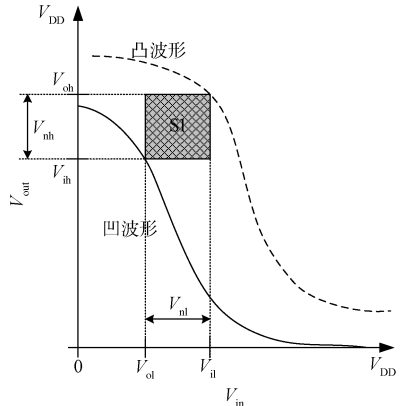


图 8 动态最大等边法噪声容限测试传输特性曲线

### 2.3 噪声容限测试方法的对比及适用性

为了考察不同噪声容限测试方法的适用性, 构建如图 9 所示的 4 种信号传输特性曲线, 虽然这 4 种曲线是人为构造的, 但只要高低电平是有效的, 那么噪声容限测试方法就应该可以满足所有测试的需要, 这样才是一个有效的测试方法。

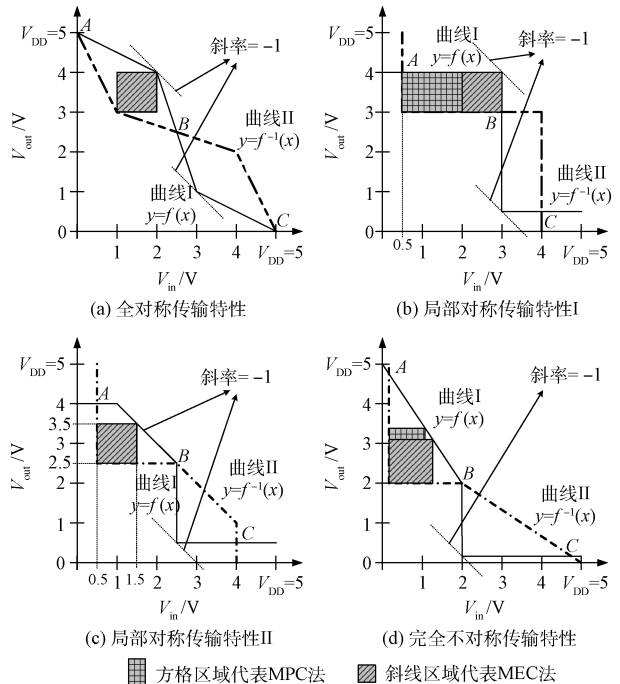


图 9 不同噪声容限测试方法在各种传输特性曲线的应用

图 9 所示的 4 种曲线包含了从全对称、局部对称到完全不对称的典型曲线,这符合现实环境中传输特性曲线的特点,表 2 列出了分别用前文所提的 NSC、BSC、MEC 和 MPC 法测试噪声容限的结果。图 9(a)代表了完全对称的传输特性曲线,在此情况下几乎所有的噪声容限测试方法都是适用的,唯一的问题是 BSC 法测出的噪声容限值偏大,BSC 法对噪声容限的估计过于乐观的问题也引起了使用者对该方法的质疑;图 9(b)代表了高低电平噪声容限不相同的情况,直观上来讲,图 9(b)输入的翻转点偏高,这意味着输入由高变低比输入由低变高更加容易让反相器输出发生翻转,从表 2 的测试结果也可以证明这一点,大多数测试方法得出的低电平噪声容限都要大于高电平噪声容限,唯一例外的是 MEC 法,由于 MEC 法限制了  $V_{nl}$  必须等于

$V_{nh}$ ,所以导致 MEC 法会低估这种高低噪声容限不一致的噪声容限结果,所以,人为限制高低噪声容限必须相等的做法在图 9(b)的情况下是不合理的;图 9(c)代表了斜率为 -1 的点不唯一的传输特性曲线,对于 NSC 和 BSC 法这类依赖斜率点的测试方法会得出多个结果,所以不适用于图 9(c)的情况;图 9(d)代表了只有一个斜率为 -1 的点的情况,NSC 和 BSC 法在此种情况下会失效,因为这两种方法都需要两个斜率为 -1 的点才能进行测试,MEC 法和 MPC 法基本上可以适用于绝大多数传输特性曲线,唯一的不同是对于高低噪声容限不一致的情况,MEC 法会给出不合理的结果,所以,相比较而言,MPC 法是适用范围最广的噪声容限测试方法。

表 2 不同测试方法在各种传输特性曲线的测试结果

(V)

测试项	高电平噪声容限 $V_{nh}$				低电平噪声容限 $V_{nl}$			
	NSC	BSC	MEC	MPC	NSC	BSC	MEC	MPC
图 9(a)	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0
图 9(b)	1.0	1.0	1.0	1.0	2.5	2.5	1.0	2.5
图 9(c)	多值	1.5	1.0	1.0	多值	多值	1.0	1.0
图 9(d)	无效	3.0	1.15	1.35	无效	无效	1.15	0.9

相比之前所提的稳态噪声容限,动态噪声容限可以避免估计过于悲观的缺点,文献[16]在  $0.18 \mu\text{m}$  工艺  $1.6 \text{ V}$  电源电压  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  下进行了动态负斜率法和动态最大等边法的噪声容限测试,负载电容  $20 \text{ fF}$ ,输入脉宽从  $30 \text{ ps}$  逐渐增加到  $300 \text{ ps}$ 。通过测试可以发现输入噪声脉宽很小的情况下,动态最大等边法测得的噪声容限值远大于动态负

斜率法。直观的理解在噪声脉宽很小的情况下,逻辑门是可以将其滤除的,也就是说噪声容限是很大的,所以,在极低脉宽的情况下,动态负斜率法是不适用的,可见动态最大等边法适用范围更广,鲁棒性更好。表 3 列出了主要的噪声容限测试方法适用性的比较。

表 3 不同测试方法比较总结

方法名称	覆盖范围	可操作性	优点	缺点
883K 3013.1	较小	简单	1) 操作简单; 2) 含动态静态测试方法; 3) 引入干扰测试且方案详细。	1) 受规定值影响大; 2) 内容有不明确之处; 3) 不能反映真实情况。
GB/T 17574 13.2	较小	简单	1) 操作简单;	1) 受规定值影响大; 2) 较为简略不易操作; 3) 不能反映真实情况。
负斜率法	中等	中等	1) 可以直接测量,操作简单;	1) 基础是和最大,非分别最大; 2) 多个 -1 斜率点,结果不唯一。
双稳态法	较小	简单	1) 不会出现不唯一情况; 2) 可扩展至动态方法。	1) 缺少理论支撑; 2) 某些器件无法求解; 3) 与 883K 中定义冲突; 4) 有时结果偏乐观。
最大等边法	较大	简单	1) 操作简单; 2) 有理论基础; 3) 适用于绝大多数传输特性。	1) 限制了高低噪声容限必须相等; 2) 需要寻找面积积极值。

方法名称	覆盖范围	可操作性	优点	缺点
最大乘法	较大	中等	1)操作简单; 2)有理论基础; 3)适用于绝大多数传输特性。	1)矩形面积的极值寻找相对复杂。
动态负斜率法	较大	复杂	1)测试结果更接近实际; 2)适用范围广; 3)可考察脉宽对影响。	1)极低脉宽不适用; 2)操作相对复杂。
动态最大等边法	较大	复杂	1)测试结果更接近实际; 2)适用范围广; 3)鲁棒性好。	1)需要寻找面积极值。

### 3 实验结果

为证明噪声容限方法的可行性,搭建了如图 10 所示的实验电路模拟无限长反相器串,电路等效的有效性在文献[13]中已经进行了证明。输入缓冲器提供输入激励,INV1 和 INV2 接成环路模拟无限长反相器串传输特性,使用 22 nm 的 BSIM4 v4.7 level 54 模型进行实验,仿真器采用 Spectre。首先将 P1、P2、N1、N2 的沟道长度  $L$  都设为最小尺寸即 22 nm, N1、N2 的沟道宽度  $W$  设为 44 nm, P1、P2 的沟道宽度设为 66 nm,沟道宽度的设置原则是保证反相器 INV1 和 INV2 的翻转电平在  $V_{dd}/2$  附近并且上升、下降时间相等,以获得最大的噪声容限,随后以 1 nm 为步长逐渐增大各管子的沟道长度直到 35 nm,每次沟道长度变化都要重新调整沟道宽度并用最大乘法计算噪声容限。最后,使用 MATLAB 对实验的结果进行整理。

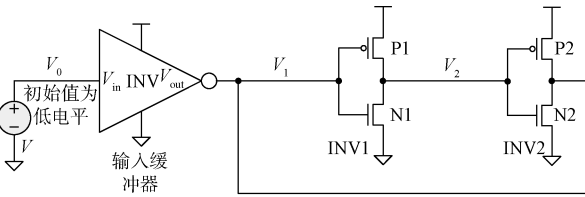


图 10 噪声容限实验电路

利用噪声容限的测试方法可以对晶体管的沟长、阈值、延迟和功耗进行折中,在实际设计过程中往往需要反复的仿真优化。测试方法在仿真软件上实现的难易程度也是测试方法适用性很重要的一个方面,负斜率法和双稳态法虽然比较好理解,但在仿真软件上想要直观的看到结果是比较困难的,尤其是对于某一种型号的器件来说,要想整体评估它的噪声特性,应该综合考虑电源波动、温度变化和工艺偏差对噪声容限的影响,需要从所有噪声容限结果中选取最差的值作为该种型号器件的噪声容限,这往往就需要利用蒙特卡洛仿真的方法,通过对各种方法的比较,最大乘法法和动态最大等边法在与自动化设计工具(EDA)协同工作方面是最方便的,如图 11 所示。

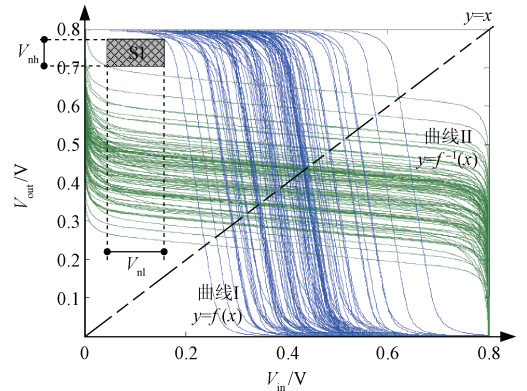


图 11 最大乘法模拟的阈值电压波动引起噪声容限变化

通过利用噪声容限测试方法对无限长反相器串的模拟,发现晶体管沟长、反相器阈值、电路负载都会对整体电路的噪声容限产生影响,结合芯片面积、功耗、延迟等指标,需要对各个设计参数进行折中,实验表明,通过对晶体管尺寸的优化,最高可以将噪声容限提高 40%,同时将功耗降低 47%。

### 4 结 论

通过以上分析,相比美军标的噪声容限测试方法,业界使用的方法更加合理,应用也更加广泛,虽然更多用于芯片设计阶段,但也可以用在生产线认证过程中,以考察设计过程的完备性。在噪声容限测试方法的具体使用过程中,有以下事项需要注意。

1)要根据实际情况选择合适的噪声容限测试方法。噪声容限测试方法种类很多,但没有一种是通用的,只是适用范围大小的问题,即便是适用范围最广的最大乘法法,也存在高/低噪声容限不对称的问题,而最基础的负斜率法成立的前提是高/低噪声容限的和最大,而不是让两个噪声容限中较小的那个最大化,所以,需要根据实际情况选择最适合当前测试的实验方法。

2)噪声容限测试方法更多的意义在于投片前对设计的指导,因为噪声容限更看重的是工艺及外部条件波动对

测试结果的影响,实际测试中样品的批次很难保证足够丰富,样品的数量也很难保证足够充足,且现代数字电路大多是同步电路,由于实测时对同步电路输入施加的干扰很难传递到输出,中间节点又不可能都接到外部引脚供测试,会造成噪声容限估计得过于乐观,所以此种测试方法在实际测试中仅限于异步电路性能的评估和对 SRAM 这类简单器件的性能测试。当噪声容限测试方法用于电路仿真时,要注意工艺参数波动范围的设置及如蒙特卡洛这类仿真方法仿真条件的合理设置。

3)虽然动态噪声容限是普遍认为较为科学的噪声容限测试方法,但测试难度要远超稳态噪声容限,窄脉冲上升下降时间的影响,输出脉冲峰值的捕捉都需要根据实际情况设计测试方案。

美军标中噪声容限制定时间很早且很少修订,但却一直存在,总结其中有如下原因。

1)长期存在是有必要性的。噪声参数无论是作为一个性能指标还是作为衡量芯片互换性的指标都有其重要的意义,从早期的小规模集成电路到现在的超大规模集成电路,处处都有对噪声影响的分析和测试,长久以来噪声性能一致很重要。

2)噪声水平评估手段多样。从之前的分析可以看出,由于噪声指标的特殊性,对噪声的分析难度很大,这其中的原因之一是噪声本身包含大量的高频分量且主要由寄生引起,为噪声影响的准确评估带来很大困难。为了解决这些问题,噪声的评估手段不断丰富,从早期的建模分析,发展到高性能仪器测量,再到大型软件模拟,以及现在的多种手段综合评估。即便这样对噪声的评估仍然存在缺陷,评估的手段仍在不停发展。多种手段共同发展给标准的制修订带来了困难,很多手段的基础理论、发展方向、评估方式都是不一样的,所以很难形成共性的测试标准,导致此类方法较少修订。

3)发挥标准的示范作用。美军标中有一些方法是针对现在较少使用的元器件的,但这些方法并未被废止,其中一个原因是这类方法对相似问题的处理提供了一个解决的思路,虽然器件不再用,但解决的思路依然适用,这是美军标处理集成电路种类极大增长、技术不断进步、用途逐渐拓宽的解决方法之一,标准文本很难覆盖所有集成电路门类,但却可以对相似问题的解决方式提供一个标准思路。MIL-STD-883 中噪声相关的测试方法较少修订却长期存在的一个原因就是此类方法发挥了标准的示范作用,为噪声相关测试方法的演进提供了一个基本的解决思路。

对于我国标准来说,噪声容限的测试方法是标准体系中很重要的一块,应该加以引入,这一方面有益于丰富我国标准对集成电路的评估手段,另一方面也可以满足我国标准与国际标准对标的需求。具体操作时我们认为一方面应保持标准的完整性,条款方面可以参照美军标,

另一方面应保持标准的先进性,具体内容制修订时可以根据具体方法目前的发展情况将最新评估手段变为我国标准中的条款,如可以适时地将最大乘法法和动态最大等边法进行引入,这样可以同时实现我国标准的自主创新。

## 参考文献

- [1] 郑鹏洲. MIL-STD-883 更名并作重大修改[J]. 质量与可靠性, 2001(4):14-15.
- [2] 刘杰,陈大为,胡海涛,等. 大功率集成电路动态老炼自动温度控制器设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(5):127-130.
- [3] GRINICH V H, JACKSON H G. Introduction to Integrated Circuits[M]. New York: McGraw-Hill, 1975:111-113.
- [4] JIANG D, LIU X K, WANG D Y, et al. Analysis of sensitivity and errors in Maglev vibration test system[J]. Instrumentation, 2016, 3(1):70-77.
- [5] HILL C F. Definitions of noise margin in logic systems [J]. Mullard Technical Communications, 1967(89): 239-245.
- [6] HILL C F. Noise margin and noise immunity in logic circuits[J]. Microelectron, 1968(1):16-21.
- [7] LOHSTROH J. Static and dynamic noise margins of logic circuits [J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 1979, 14(3):591-598.
- [8] LOHSTROH J. Calculation method to obtain worst-case static noise margins of logic circuits[J]. Electron Lett, 1980(16):273-274.
- [9] LOHSTROH J. The punch-through device as a passive exponential load in fast static bipolar RAM cells[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1979, 14(5): 840-844.
- [10] HAUSER J R. Noise margin criteria for digital logic circuits[J]. IEEE Transactions on Education, 1993, 36(4):363-368.
- [11] 周东旺,李舜韶,江星星,等. 基于传递函数估计的近场声全息的噪声源识别[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12):2875-2880.
- [12] 郭小青,李东新,田正宏,等. 基于噪声信号的振捣棒工作状态判定方法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(8):15-18.
- [13] MEAD C, CONWAY L. Introduction to VLSI Systems[M]. New Jersey: Addison-Wesley, 1980: 351-355.
- [14] SHEPARD K L, CHOU K. Cell characterization for noise stability [C]. Custom Integrated Circuits Conference, 2000:91-94.



- [15] SOMASEKHAR D. Dynamic noise analysis in pre-chargeevalutatecircuits [ C ]. Design Automation Conference,2000: 243-246.
- [16] YUAN J S, LI Y. Teaching digital noise and noise margin issues in engineering education [J]. IEEE Transactions, 2005, 48(1):162-168.

(上接第 13 页)

## 参考文献

- [1] 吴锦源,梁国坤. 顺序控制在变电站倒闸操作中的应用[J]. 南方电网技术,2009,3(3):45-47.
- [2] 周立辉,张永生,孙勇. 智能检机器人研制及应用[J]. 电力系统及自动化,2011, 35(19):85-88.
- [3] 施月玲,宣凯,张海平,等. JNI 技术在 Android 平台融合通信终端的应用[J]. 杭州电子科技大学学报:自然科学版,2015,35(2):41-44.
- [4] 张传真,张莉,江建军. Android 平台的无线视频监控小车的设计[J]. 电子测量技术,2013,36(10):19-22.
- [5] 李光明,孙英爽,党小娟. 基于安卓的远程监控系统的设计与实现[J]. 计算机工程与设计,2016,37(2):556-560.
- [6] 王志凌,闻凯,陈杰. 基于 Android 的小型移动机器人控制系统[J]. 国外电子测量技术,2014,33(9):4-7.

## 作者简介

菅端端,工学硕士,高工,主要研究方向为模拟和混合集成电路设计及测试技术、超高频无源标签和读写器标准及测试技术、MEMS 传感器测试技术等。

E-mail:jiandd@cesi. cn

- [7] 许珍,苏亚辉,夏懿,等. 基于 LabVIEW 的远程视频监控系统设计及实现[J]. 中北大学学报:自然科学版,2015,36(5):533-539.
- [8] 李婧,张永祥,石炳寅. 基于 LabVIEW 远程校准系统的设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报,2012, 26(S1):59-62.
- [9] 刘贵杰,刘立静,唐婷. 基于 LabVIEW 的锅炉燃烧远程监控方法研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(增刊):421-422.
- [10] 朱里红,王定文. 基于模糊 PID 的电磁循迹小车控制系统[J]. 兵工自动化,2016,35(2):44-47.

## 作者简介

王德玉,硕士研究生,主要研究方向为电力电子、机器人控制、计算机网络等。

E-mail:1527793308@qq. com