



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—××××

混合集成电路测试系统校准规范

Calibration Specification for Mixed Signal Integrated Circuit Testing
System

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

混合集成电路参数校准规范
Calibration Specification for Mixed
Signal Integrated Circuit Testing System

JJF XXXX—XXXX

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：中国电子技术标准化研究院

参加起草单位：中国计量科学研究院

本规范委托全国无线电计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

赵 昭（中国电子技术标准化研究院）

李 雷（中国电子技术标准化研究院）

（中国计量科学研究院）

参加起草人：

于利红（中国电子技术标准化研究院）

目 录

引 言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 概述.....	1
4 计量特性.....	1
4.1 系统时钟频率.....	1
4.2 数字通道频率.....	2
4.3 驱动单元.....	2
4.4 比较单元.....	2
4.5 器件电源单元.....	2
4.6 精密测量单元.....	2
4.7 波形发生单元.....	2
4.8 波形数字化单元.....	2
5 校准条件.....	2
5.1 环境条件.....	2
5.2 校准用设备.....	3
6 校准项目和校准方法.....	4
6.1 校准项目.....	4
6.2 校准前准备.....	4
6.3 校准方法.....	5
8 校准结果表达.....	12
7 复校时间间隔.....	13
附录 A 原始记录格式.....	14
附录 B 校准证书内页格式.....	18
附录 C 主要项目校准结果不确定度评定示例.....	22

引 言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》编写，相关术语及测量不确定度评定遵循 JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》两个文件。

本校准规范规定了 DC~1GHz 工作频段射频集成电路测试系统的校准项目和校准方法，附录中给出了各校准参数的测量结果的测量不确定度评定示例。

本规范为首次发布。

混合集成电路测试系统校准规范

1 范围

本规范适用于 DC~1GHz 频段混合集成电路测试系统的校准。

2 引用文件

GB/T 17574 《半导体器件 集成电路 第 2 部分：数字集成电路》

GJB 548B-2005 《微电子器件试验方法和程序》

凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本规范。

3 概述

集成电路测试系统是指在集成电路生产、使用中用于产品电性能参数测试的设备。一般为数字集成电路测试系统、模拟集成电路测试系统和混合集成电路测试系统，混合集成电路测试系统测试对象是混合信号集成电路器件。

混合集成电路测试系统的典型结构由数字部分和模拟部分及电源等辅助部分构成。数字部分主要负责混合电路中的数字部分的信号的测试，包括驱动/比较单元、图形发生器、时钟发生器、精密测量单元。模拟部分主要负责模拟部分信号的建立与输出信号的获取。主要由波形发生单元、波形数字化单元组成。混合集成电路测试系统结构示意图，如图 1 所示。

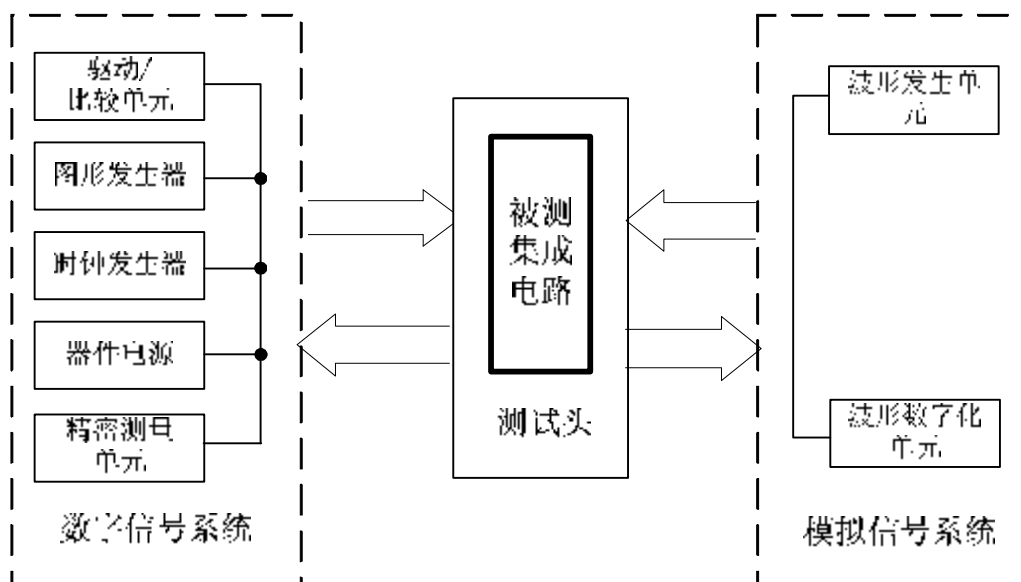


图 1 混合集成电路测试系统结构示意图

4 计量特性

4.1 系统时钟频率

系统时钟频率：10MHz、100MHz，最大允许误差： $\pm 1 \times 10^{-7}$

4.2 数字通道频率

频率范围：1kHz~1GHz，最大允许误差： $\pm 1 \times 10^{-5}$

4.3 驱动单元

驱动电压范围： $\pm(10\text{mV} \sim 20\text{V})$ ，最大允许误差：10mV

脉冲宽度： $\geq 1\text{ns}$

上升下降时间： $\leq 0.9\text{ns}$

4.4 比较单元

电压测量范围： $\pm(10\text{mV} \sim 7\text{V})$ ，最大允许误差 10mV

4.5 器件电源单元

电压范围： $\pm(10\text{mV} \sim 50\text{V})$ ，最大允许误差： $\pm 0.05\%$

电流范围： $\pm(1\mu\text{A} \sim 4\text{A})$ ，最大允许误差： $\pm 0.5\%$

4.6 精密测量单元

施加电压范围： $\pm(10\text{mV} \sim 100\text{V})$ ，最大允许误差： $\pm(0.5\% \sim 1\%)$

测量电压范围： $\pm(10\text{mV} \sim 100\text{V})$ ，最大允许误差： $\pm(0.5\% \sim 1\%)$

施加电流范围： $\pm(1\mu\text{A} \sim 2\text{A})$ ，最大允许误差： $\pm 0.5\%$

测量电流范围： $\pm(1\mu\text{A} \sim 2\text{A})$ ，最大允许误差： $\pm 0.5\%$

4.7 波形发生单元

频率设置范围：50Hz~1GHz，最大允许误差： $\pm 0.01\%$

幅度设置范围：10mV~4V，最大允许误差： $\pm 1\%$

谐波： $\leq -30\text{dBc}$

非谐波： $\leq -60\text{dBc}$

4.8 波形数字化单元

频率测量范围：50Hz~1GHz

幅度测量范围：8mV~10V

5 校准条件

5.1 环境条件

1) 环境温度：23℃~28℃；

2) 相对湿度：小于 70%；

- 3) 电源电压及频率: $(220\pm 11)\text{V}$ 、 $(50\pm 1)\text{Hz}$;
- 4) 周围无影响正常工作的机械振动和电磁干扰。

5.2 校准用设备

5.2.1 标准电压源

直流电压范围: $\pm(1\text{mV}\sim 1000\text{V})$

最大允许误差: $\pm 0.01\%$

5.2.2 数字多用表

直流电压范围: $\pm(1\text{mV}\sim 1000\text{V})$

最大允许误差: $\pm 0.01\%$

直流电流范围: $\pm(1\mu\text{A}\sim 4\text{A})$

最大允许误差: $\pm(0.05\%\sim 0.1\%)$

交流电压范围: $10\text{mV}\sim 20\text{V}$ (频率: $\text{DC}\sim 1\text{MHz}$)

最大允许误差: $\pm(0.05\%\sim 0.1\%)$

5.2.3 测量接收机

频率范围: $1\text{MHz}\sim 1\text{GHz}$;

电压范围: $10\text{mV}\sim 4\text{V}$;

最大允许误差: $\pm 0.1\%$;

5.2.4 频率计数器

频率范围: $100\text{Hz}\sim 1\text{GHz}$

最大允许误差: $\pm 1\times 10^{-7}$

5.2.5 数字示波器

带宽: 大于 10GHz

幅值范围: $1\text{mV/div}\sim 1\text{V/div}$

5.2.6 标准电阻器组

范围: $1\Omega\sim 100\text{M}\Omega$

最大允许误差: $\pm(0.5\%\sim 0.02\%)$

5.2.7 信号源

频率范围: $1\text{MHz}\sim 1\text{GHz}$

输出功率电平范围: $-110\text{dBm}\sim +20\text{dBm}$

功率电平最大允许误差： $\pm 1.0\text{dB}$

5.2.8 频谱分析仪

频率范围：应覆盖被检系统波形发生单元输出信号的三次谐波的频率范围

电平测量动态范围： $\geq 100\text{dB}$

相对电平最大允许误差： $\pm 0.2\text{dB}$

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目见表 1。

表 1 校准项目表

序号	单元名称	项目名称
1	/	外观及工作正常性检查
2	时钟	系统时钟频率
3	数字通道	数字通道频率
4	驱动单元	驱动单元电压
5		驱动单元脉冲宽度
6		驱动单元上升下降时间
7	比较单元	比较单元电压
8	器件电源单元	器件电源单元电压
9		器件电源单元电流
10	精密测量单元	精密测量单元施加电压
11		精密测量单元测量电压
12		精密测量单元施加电流
13		精密测量单元测量电流
14	波形发生单元	波形发生单元频率
15		波形发生单元幅度
16		波形发生单元谐波
17		波形发生单元非谐波
18	波形数字化单元	波形数字化单元频率
19		波形数字化单元幅度

6.2 校准前准备

检查系统正常工作所配套附件是否齐全。校准之前，仪器应按照仪器说明书要求预热。按系统规定时间预热后，仪器应能正常工作。运行系统自校准程序，系统全部指标均为合格状态。

6.3 校准方法

6.3.1 校准点的选择

校准点应覆盖所有量程并兼顾各量程之间的覆盖性及量程内的均匀性，同时应参考被校系统使用说明书中对校准点的建议，并可根据实际情况或送校单位的要求选取校准点。

6.3.2 系统时钟频率

校准设备连接如图 1 所示：

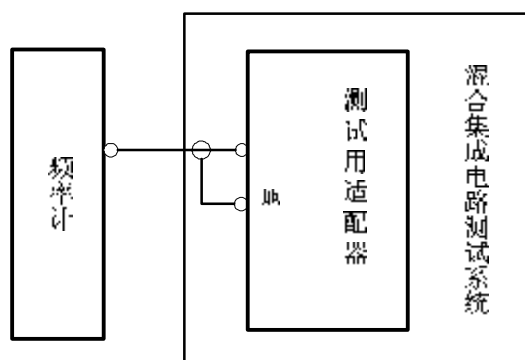


图 1 系统时钟频率校准连接图

将频率计的探头与系统时钟板相连接，探头的地端与系统的地连接。通常主时钟频率为 10MHz、100MHz，频率计读取频率值，记录于附录 A 表 A.1 中。

6.3.3 数字通道频率

校准设备连接如图 2 所示。

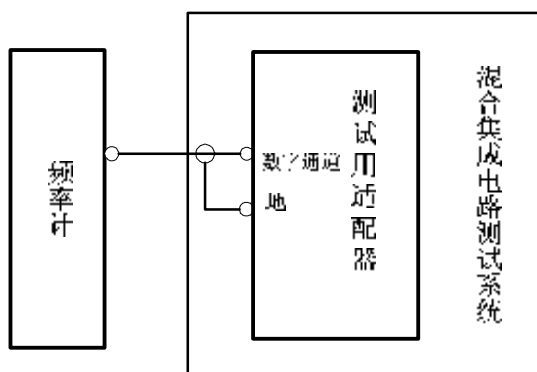


图 2 数字通道频率校准连接图

将频率计的探头与被校系统的数字通道相连接，探头的地端与系统的地连接。在被校系统量程范围内，选取包括高、中、低在内的至少 3 个点，作为校准点。编制并运行相关校准程序，使数字通道输出频率为占空比 50% 的波形。频率计读取频率值，记录于附录 A 表 A.2 中。对于多个数字通道，重复以上校准步骤。

6.3.4 驱动单元设置电压

校准设备连接如图 3 所示。

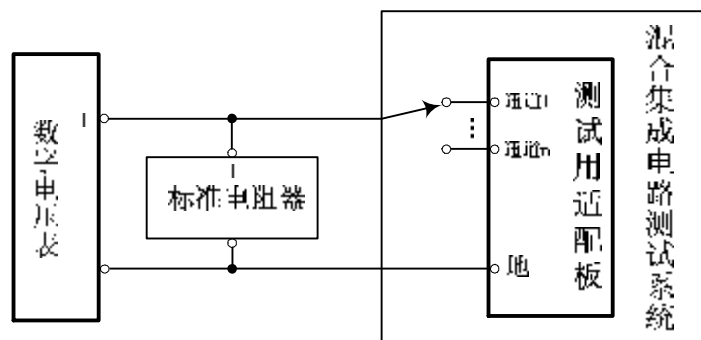


图 3 驱动单元设置电压校准连接图

将被校系统的驱动单元相应通道与数字电压表连接，数字电压表设置为直流电压方式。在被校系统量程范围内，选取包括高、中、低在内的至少 3 个点，作为校准点。数字电压表读取电压值，记录于附录 A 表 A.3 中。对于多个驱动单元通道，重复以上校准步骤。

6.3.5 驱动单元脉冲宽度

校准设备连接如图 4 所示。

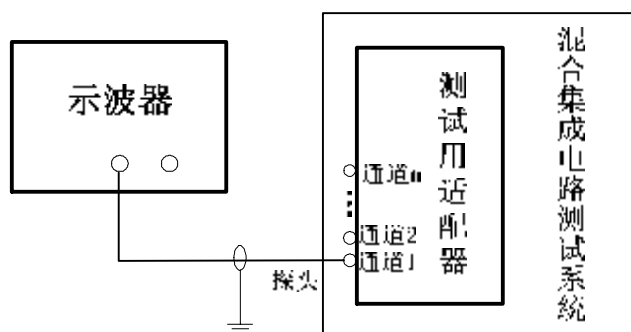


图 4 驱动信号脉冲宽度校准连接图

将示波器的探头与被校系统驱动单元通道相连接。在被校系统测量范围内，选取包括高、中、低在内的至少 3 个点，作为校准点。编制并运行相关校准程序，使驱动单元通道输出频率为占空比 50% 的波形。示波器读取脉冲宽度值，记录于附录 A 表 A.4 中。对于驱动单元通道，重复以上校准步骤。

6.3.6 驱动单元上升时间/下降时间

校准设备连接如图 5 所示。

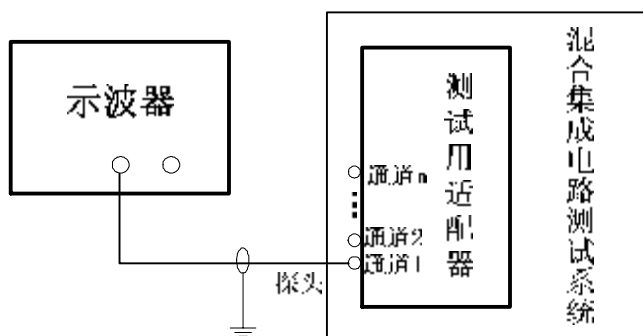


图5 上升/下降时间校准连接图

将示波器的探头与被校系统驱动单元通道相连接。在被校系统测量范围内，选取包括高、中、低在内的至少3个点，作为校准点。编制并运行相关校准程序，使驱动单元通道输出频率为占空比50%的波形。示波器分别测量电压幅度10%~90%之间的时间（上升时间），电压幅度90%~10%之间的时间（下降时间），记录于附录A表A.5中。对于多个驱动单元通道，重复以上校准步骤。

6.3.7 比较单元电压测量

校准设备连接如图6所示。

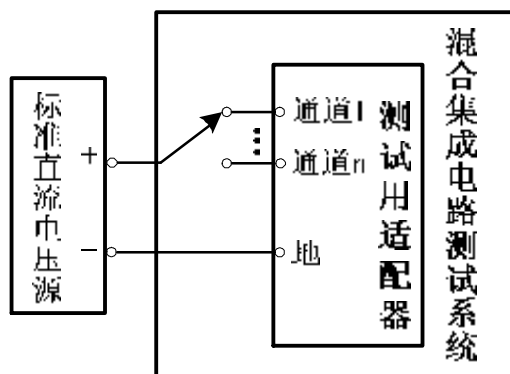


图6 比较单元测量电压校准连接图

将被校系统的比较单元相应通道与标准直流电压源相连接。在被校系统量程范围内，选取包括高、中、低在内的至少3个点，作为校准点。读取电压源的电压读数和系统测量值，记录于附录A表A.6中。对于多个驱动单元，重复以上校准步骤。

6.3.8 器件电源设置电压校准

校准设备连接如图7所示。

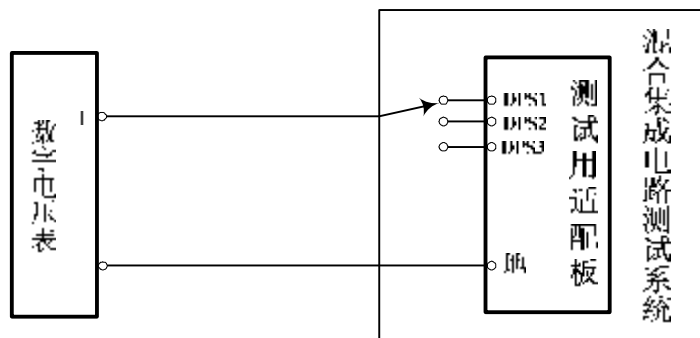


图7 器件电源设置电压校准连接图

将被校系统的器件电源通道与数字电压表连接，数字电压表设置为直流电压模式。在被校系统量程范围内，选取包括高、中、低在内的至少3个点，作为校准点。用数字电压表读取电压值，并记录于附录A表A.7中。对于多个器件电源单元，重复以上校准步骤。

6.3.9 器件电源电流校准

校准设备连接如图8所示。

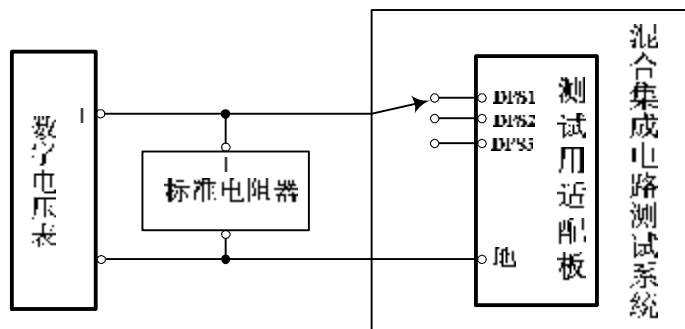


图8 器件电源电流校准方法连接图

将被校系统的器件电源通道与标准电阻器与数字电压表相连接，数字电压表设置为直流电压测量模式。根据器件电源电流的量程及校准点，选取适当的标准电阻器（考虑被校系统器件电源的负载能力，从小电流量程开始校准）。在被校系统量程范围内，选取包括高、中、低在内的至少3个点，作为校准点。数字电压表读取电压值，根据标准电阻器值，计算标准电流值，将计算结果记录于附录A表A.8中。对于多个器件电源单元，重复以上校准步骤。

6.3.10 精密测量单元施加电压

校准设备连接如图9所示。

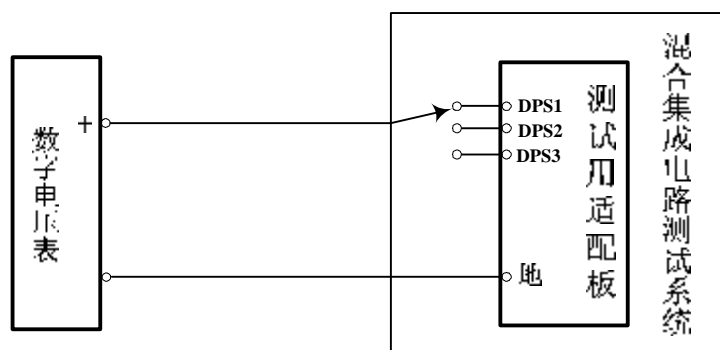


图9 精密测量单元施加电压校准连接图

将被校系统的精密测量单元通道与标准电阻器和数字电压表连接，数字电压表设置为直流电压模式。被校系统设置精密测量单元为加压模式，在被校系统量程范围内，选取包括高、中、低在内的至少3个点，作为校准点。数字电压表读取电压值，将计算结果记录于附录 A 表 A.9 中。对于多个精密测量单元，重复以上校准步骤。

6.3.11 精密测量单元测量电压

校准设备连接如图 10 所示。

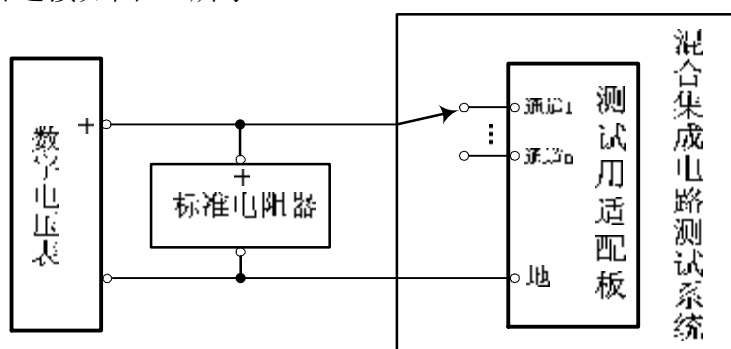


图10 精密测量单元测量电压校准连接图

将被校系统的精密测量单元通道与标准电阻器和数字电压表连接，数字电压表设置为直流电压模式。被校系统设置精密测量单元为测压模式，根据精密测量单元测量电压的量程及校准点，选取适当的标准电阻器。在被校系统量程范围内，选取包括高、中、低在内的至少3个点，作为校准点。数字电压表读取电压值，记录于附录 A 表 A.10 中。对于多个精密测量单元，重复以上校准步骤。

6.3.12 精密测量单元施加电流校准

校准设备连接如图 11 所示。

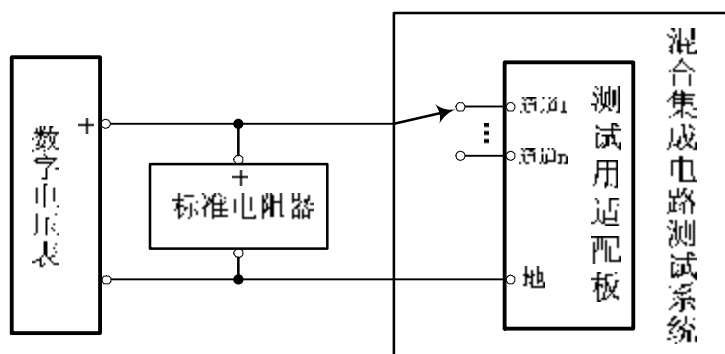


图 11 精密测量单元施加电流校准连接图

将被校系统的精密测量单元通道与标准电阻器和数字电压表相连接，数字电压表设置为直流电压测量方式。被校系统设置精密测量单元为加流模式，根据精密测量单元施加电流的量程及校准点，选取适当的标准电阻器。在被校系统量程范围内，选取包括高、中、低在内的至少 3 个点，作为校准点。数字电压表读取电压值，根据标准电阻器值，计算标准电流值，将计算结果记录于附录 A 表 A.11 中。对于不同通道的精密测量单元，重复以上的校准步骤。

6.3.13 精密测量单元测量电流校准

校准设备连接如图 12 所示。

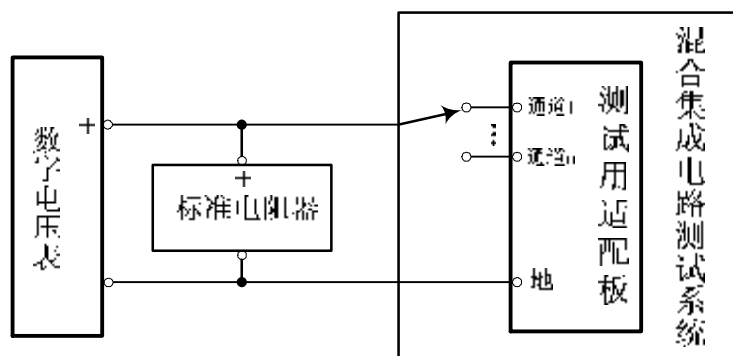


图 12 精密测量单元测量电流校准连接图

将被校系统的精密测量单元通道与标准电阻器和数字电压表连接，数字电压表设置为直流电压模式。被校系统设置精密测量单元为测流模式，根据精密测量单元测量电流的量程及校准点，选取适当的标准电阻器。在被校系统量程范围内，选取包括高、中、低在内的至少 3 个点，作为校准点。数字电压表读取电压值，被校系统读取电流测量值；根据标准电阻器值，计算标准电流值，将计算结果记录于附录 A 表 A.12 中。对于多个精密测量单元，重复以上校准步骤。

6.3.14 波形发生单元幅度、频率校准

校准设备连接如图 13 所示。

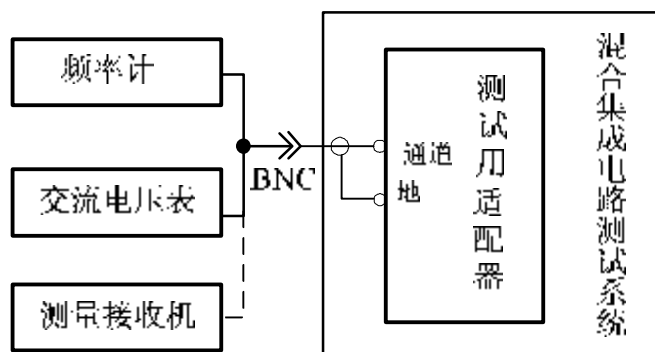


图 13 波形发生器频率、幅度设置校准连接图

将交流电压表（1MHz 以下）或测量接收机（1MHz 以上）和频率计与被校系统的波形发生单元通道连接，注意阻抗匹配。在被校系统测量信号频率和幅值范围内，选取不同的频率和幅值组合校准点，应保证涵盖所有量程组合内的高、中、低校准点。按要求设定输出频率和输出幅值，频率计和交流电压表或测量接收机分别测量幅值、频率测量。分别记录于表附录 A 表 A.13、表 A.14 中。

6.3.15 波形发生单元谐波、非谐波校准

校准设备连接如图 14 所示。

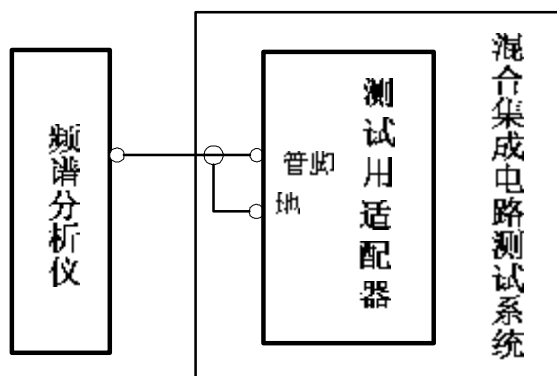


图 14 谐波/非谐波校准连接图

1) 将频谱分析仪与被校系统的波形发生单元通道连接，注意阻抗匹配。在被校系统信号频率范围内，选取不同的频率点，用频谱仪测出基波电平 L_1 ，二次谐波 L_2 。记录于表附录 A 表 A.15 中。按下式计算。

$$\text{二次谐波: } a_2 = L_2 - L_1 \text{ (dBc)}$$

2) 在被校系统信号频率范围内，选取不同的频率点，用频谱仪测出基波电平 L_1 和偏离载频的最大非谐波电平 $L_{\text{非}}$ 。记录于表附录 A 表 A.16 中。按下式计算。

$$\text{非谐波: } a_2 = L_{\text{非}} - L_1 \text{ (dBc)}$$

6.3.16 波形数字化单元频率、幅度校准

校准设备连接如图 15 所示。

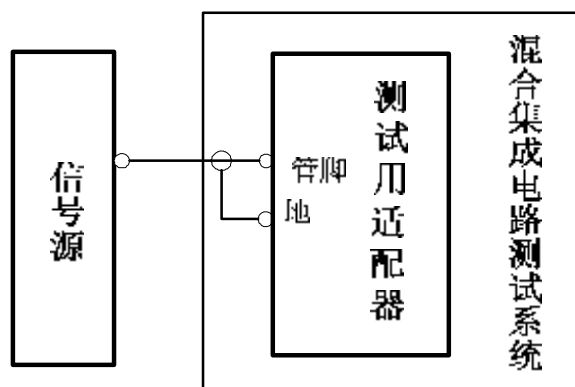


图 15 波形数字化单元频率、幅度测量校准连接图

将信号源与被校系统的波形数字化单元通道连接，注意阻抗匹配。在被校系统测量信号频率和幅值范围内，选取不同的频率和幅值组合校准点，应保证涵盖所有量程组合内的高、中、低校准点。信号源按要求设定输出频率和输出幅值，分别记录信号源的设置值和被检系统的测量值于附录 A 表 A.17、表 A.18 中。

8 校准结果表达

校准后，出具校准证书。校准证书由封面和校准数据组成。封面由校准机构确定同一格式，校准数据按附录所列数据表格，并可根据被测仪表的情况进行填写。证书至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；

- l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

7 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年, 由用户根据使用情况自行确定。

附录 A

原始记录格式

外观和工作正常性功能检查：

工作正常性：正常 不正常

表 A.1 系统时钟频率

设置值	实测值	不确定度 $k=2$
10MHz		
100MHz		

表 A.2 数字通道频率

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 A.3 驱动单元电压

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 A.4 驱动单元脉冲宽度

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 A.5 驱动单元上升下降时间

实测值		不确定度 $k=2$
上升时间	下降时间	

表 A.6 比较单元测量电压

标准设置值	比较器测量值	不确定度 $k=2$

表 A.7 器件电源设置电压

量程	设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 A.8 器件电源电流

标准电阻	实测电压值	系统电流值	标准测量电流值	不确定度 $k=2$

表 A.9 精密测量单元施加电压

量程	设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 A.10 精密测量单元测量电压

量程	系统测量值	实测值	不确定度 $k=2$

表 A.11 精密测量单元施加电流

标准电阻	实测电压值	系统设置电流值	标准测量电流值	不确定度 $k=2$

表 A.12 精密测量单元测量电流

标准电阻	实测电压值	系统测量电流值	标准测量电流值	不确定度 $k=2$

表 A.13 波形发生单元幅值

频率	幅度设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 A.14 波形发生单元频率

频率设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 A.15 波形发生单元谐波

载波频率	基波电平	二次谐波电平	二次谐波	不确定度 $k=2$

表 A.16 波形发生单元非谐波

载波频率	基波电平	非谐波电平	非谐波	不确定度 $k=2$

表 A.17 波形数字化单元幅值

频率	设置值	系统测量值	不确定度 $k=2$
f_1			
f_2			

--	--	--	--

表 A.18 波形数字化单元频率

频率值	系统测量值	不确定度 $k=2$

附录 B

校准证书内页格式

表 B.1 系统时钟频率

设置值	实测值	不确定度 $k=2$
10MHz		
100 MHz		

表 B.2 数字通道频率

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.3 驱动单元电压

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.4 驱动单元脉冲宽度

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.5 驱动单元上升/下降时间

实测值		不确定度 $k=2$
上升时间	下降时间	

表 B.6 比较单元测量电压

标准设置值	比较器测量值	不确定度 $k=2$

表 B.7 器件电源设置电压

量程	设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.8 器件电源电流

标准电阻	实测电压值	系统电流值	标准测量电流值	不确定度 $k=2$

表 B.9 精密测量单元施加电压

量程	设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.10 精密测量单元测量电压

量程	系统测量值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.11 精密测量单元施加电流

标准电阻	实测电压值	系统设置电流值	标准测量电流值	不确定度 $k=2$

表 B.12 精密测量单元测量电流

标准电阻	实测电压值	系统测量电流值	标准测量电流值	不确定度 $k=2$

--	--	--	--	--

表 B.13 波形发生单元幅值

频率	幅度设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.14 波形发生单元频率

频率设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.15 波形发生单元谐波

载波频率	基波电平	二次谐波电平	二次谐波	不确定度 $k=2$

表 B.16 波形发生单元非谐波

载波频率	基波电平	非谐波电平	非谐波	不确定度 $k=2$

表 B.17 波形数字化单元幅值

频率	设置值	实测值	不确定度 $k=2$
f_1			
f_2			

表 B.18 波形数字化单元频率

频率值	系统测量值	不确定度 $k=2$

--	--	--

附录 C 主要项目校准结果不确定度评定示例

C.1 数字通道频率测量不确定度评定

C.1.1 测量方法

数字通道频率校准采用直接测量，将被校测试系统的数字通道连接至频率计输入，由频率计读出频率值即为数字通道频率值。

C.1.2 测量模型

$$f=f_0 \quad (\text{C.1})$$

式中

f ——被校混合集成电路测试系统输出频率设置值

f_0 ——频率计读数值

不确定度来源：频率计频率测量准确度引入的不确定度 u_{B1} ，频率计显示分辨力引入的不确定度 u_{B2} ，测量重复性引入的不确定度 u_A ，这些量值彼此不相关。

C.1.3 标准不确定度分量评定

1) 频率计频率测量准确度引入的不确定度分量

频率计频率测量准确度为 1×10^{-7} ，即 a_1 为 1×10^{-7} ，测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，由此引入的标准不确定度分量为：

$$u_1 = a_1/k = 1 \times 10^{-7} / \sqrt{3} = 5.8 \times 10^{-8}$$

2) 频率计显示分辨力引入的不确定度分量

由频率计的技术说明书，当测量频率为 1GHz 时，频率计的频率分辨力为 1Hz，则频率计显示分辨力引入的相对误差 a_2 为 1.7×10^{-10} ，设测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布， $k=\sqrt{3}$ 。

由分辨率引入的标准不确定度分量为：

$$u_2 = a_2/k = 1.7 \times 10^{-10} / \sqrt{3} = 1 \times 10^{-10}$$

3) 测量重复性引入的不确定度分量

使用频率计对 1GHz 的输出频率进行 10 次测量，测量结果如表 C.1 所示。

表 C.1 频率校准结果重复性数据

测量次数	实测值(GHz)
1	0.9999998
2	0.9999997
3	0.9999998

4	0.9999996
5	0.9999998
6	0.9999996
7	0.9999998
8	0.9999997
9	0.9999998
10	0.9999997

由贝塞尔公式

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

实验标准偏差为 8.2×10^{-8} GHz，由重复性测量引入的测量不确定度分量为 2.6×10^{-8} 。

C.1.4 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 C.2。

表 C.2 输出频率校准不确定度分量汇总表

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k	标准不确定度
频率计频率测量准确度	u_{B1}	B	均匀	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-8}
频率计显示分辨力	u_{B2}	B	均匀	$\sqrt{3}$	1×10^{-10}
频率计读数重复性	u_A	A	—	—	2.6×10^{-8}

C.1.5 合成标准不确定度评定

以上各不确定度分量不相关，显示分辨力和读数重复性只考虑到最大值参与到不确定度合成。合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_{B1}^2 + u_A^2} = 6.2 \times 10^{-8}$$

C.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 1.3×10^{-7} 。

C.2 交流电压参数测量不确定度评定

交流电压参数的校准方法为直接测量法，将被校系统上的波形发生单元与数字电压表或测量接收机相连接，通过外部数字多用表或者测量接收机测量电压。对于频率为 1kHz~1MHz 的交流信号，利用数字多用表 3458A 进行校准；对于 1MHz~1GHz 的交流信号，利用测量接收机进行校准。因此，对于测量不确定度

的评定，按照 100kHz~1MHz、1MHz~1GHz 两个频率段，采用不同的方法进行评定。

C.2.1 (1kHz~1MHz) 交流电压的测量不确定度评定

C.2.1.1 测量方法

交流电压参数的校准方法为直接测量法，将被校系统上的波形发生单元与数字电压表相连接。以 100kHz 频点，1V 电压为例进行测量不确定度分析。

C.2.1.2 数学模型

$$V=V_0 \quad (C.2)$$

式中

V ——被校混合集成电路测试系统输出频率交流电压设置值

V_0 ——数字多用表读数

不确定度来源：重复性测量引入的不确定度分量 u_A ，数字多用表交流电压测量不准引入的不确定度分量 u_{B1} 、其它因素引入的不确定度分量 u_{B2} ，这些量值彼此不相关。

C.2.1.3 标准不确定度分量评定

1) 重复性测量引入的不确定度分量

用数字多用表进行重复测量 10 次，得到电压值（单位 V）。

表 C.3 交流电压校准结果重复性

测量次数	实测值 (V)
1	1.003
2	1.002
3	1.005
4	1.006
5	1.004
6	1.003
7	1.002
8	1.003
9	1.001
10	1.003

由贝塞尔公式得到实验标准偏差为 1.5mV，由重复测量引入的测量不确定度为 0.5mV。

2) 数字多用表交流电压测量不准引入的不确定度分量

根据数字多用表 3458A 的技术手册，100kHz 下的交流电压最大允许误差为 1%，按均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，由 3458A 交流电压测量不准引入的不确定度分量为：

$$u_{B1}=\frac{2\%}{\sqrt{3}}=0.6\%，1V \text{ 校准点的不确定度分量为 } 6\text{mV}。$$

3) 其它因素引起的不确定度分量

供电电源干扰引入的不确定度： u_{B2} 设为 0.1mV。

数字电压表温度漂移引入的不确定度： u_{B3} 设为 0.1mV。

C.2.1.4 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 C.4。

表 C.4 交流电压校准不确定度分量汇总表

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k	标准不确定度
电压测量重复性引入的不确定度	u_A	A	—	—	0.5mV
电压表测量电压引入的不确定度	u_{B1}	B	均匀	$\sqrt{3}$	6mV
供电电源干扰引入的测量不确定度	u_{B2}	B	—	—	0.1mV
数字电压表温度漂移引入的不确定度	u_{B3}	B	—	—	0.1mV

C.2.1.5 合成标准不确定度

以上各分量不相关，合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2} = 6.2\text{mV}$ 。

C.2.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 12.4mV，相对不确定度为 1.3%。

C.2.2 (1MHz~1GHz) 交流电压参数的测量不确定度评定

C.2.2.1 测量方法

对于 (1MHz~1GHz) 交流电压参数利用测量接收机校准。以 1GHz 频点，1V 电压为例进行测量不确定度分析。

C.2.2.2 数学模型

$$V=V_0 \quad (\text{C.3})$$

式中

V ——被校混合集成电路测试系统输出频率交流电压设置值

V_0 ——测量接收机读数值

不确定度来源：测量接收机测量不准引入的不确定度分量 u_{B1} 、功率座校准

因子不准引入的不确定度分量 u_{B2} 、阻抗失配引入的测量不确定度分量 u_{B3} 、重复性测量引入的不确定度分量 u_A ，这些量值彼此不相关。

C.2.2.3 标准不确定度分量评定

1) 测量接收机测量不准引入的不确定度分量

根据 8902A 的技术手册，1GHz 下的最大允许误差为 1.0%，服从均匀分布，由测量接收机测量不准引入的不确定度分量为 $u_{B1} = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.6\%$ ，1V 校准点的测量不确定度分量为 6mV。

2) 功率座校准因子不准引入的不确定度分量

根据功率座 11722A 的技术手册，功率座的校准因子最大允许误差为 1.5%，服从均匀分布，由校准因子不准引入的不确定度分量为 $u_{B2} = \frac{1.5\%}{\sqrt{3}} = 0.9\%$ ，1V 校准点的不确定度分量为 9mV。

3) 阻抗失配引入的不确定度分量

阻抗失配引入的测量不确定度 u_{B3} 约为 0.3mV。

4) 重复性测量引入的不确定度分量

用测量接收机 8902 和功率座 11722A 对 1GHz 的 1V 电压重复测量 10 次，得到电压值为：

表 C.5 交流电压测量重复性数据

测量次数	实测值 (V)
1	0.996
2	0.992
3	0.998
4	0.994
5	0.996
6	0.993
7	0.996
8	0.995
9	0.992
10	0.997

由贝塞尔公式得到实验标准偏差为 2.1mV，由重复性测量引入的不确定度分量为 0.7mV。

C.2.2.4 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 C.6。

表 C.6 交流电压校准不确定度分量汇总表

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k	标准不确定度
测量重复性引入的不确定度	u_A	A 类	—		0.7mV
测量接收机不准引入的不确定度	u_{B1}	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	6mV
功率座校准因子不准引入的不确定度	u_{B2}	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	9mV
阻抗失配引入的不确定度	u_{B3}	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.3mV

C.2.2.5 合成标准不确定度

以上各分量不相关，则 $u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2} = 11\text{mV}$ 。

C.2.2.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 22mV，换算为相对不确定度为 2.2%。

C.3 上升时间测量不确定度分评定

C.3.1 测量方法

驱动单元驱动信号的上升时间校准为直接测量法，将示波器一个通道与被校准系统上的一个数字驱动信号通道相连接，使驱动单元输出脉冲信号。

C.3.2 测量模型

$$t=t_0 \quad (\text{C.4})$$

式中

t ——被校混合集成电路测试系统驱动信号的上升时间设置值

t_0 ——示波器读数值

不确定度来源：重复性引入的不确定度分量 u_A ，示波器上升时间引入的不确定度分量 u_{B1} ，示波器的时间测量不准引入的不确定度分量 u_{B2} ，这些量值彼此不相关。

C.3.3 标准不确定度分量评定

1) 由测量重复性引入的不确定度分量

以幅度电压为 1V、上升时间是 0.5ns 的脉冲信号为例，进行连续 10 次独立测量，测量数据见表 C7。

表 C.7 上升时间测量重复性数据

测量次数	实测值 (ns)
1	0.54

测量次数	实测值 (ns)
2	0.55
3	0.54
4	0.54
5	0.54
6	0.53
7	0.53
8	0.56
9	0.56
10	0.52

由贝塞尔公式得到实验标准偏差为 0.012ns，重复性引入的不确定度为 0.004ns。

2) 由示波器电压测量不准引入的不确定度分量

示波器电压测量不准会对上升时间的测量引入不确定度分量，DSA70804B 的电压测量最大允许误差约为 0.1%。校准 1V 电压的上升时间，电压上下阈值的最大误差为 1mV。当上升时间为 0.5ns 时，电压上阈值或下阈值测量不准导致的时间测量最大误差为 10ps，引入的不确定度分量为

$$u_{B1} = \frac{2 \times 10 ps}{\sqrt{3}} = 11 ps$$

3) 由示波器的时间测量准确度引入的不确定度分量

根据 DPO70804 的校准证书，在 200ps/div 条件下，示波器的时间测量不确定度为 0.02%，因此由示波器的时间测量准确度引入的不确定度分量为 1ps。

C.3.4 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 C8。

表 C.8 上升时间校准不确定度分量汇总表

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k	标准不确定度
重复性引入的不确定度	u_A	A 类	—	—	4ps
由示波器电压测量不准	u_{B1}	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	11ps
示波器的时间测量引入的不确定度	u_{B2}	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	1ps

C.3.5 合成标准不确定度

以上各分量不相关，合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = 12ps$ 。

C.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 24ps，相对扩展不确定度为 4.8%。
