



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—××××

数字集成电路测试系统校准规范

Calibration Specification for Digital Integrated Circuit Testing System

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家市场监督管理总局 发布

数字集成电路测试系统校准规范

Calibration Specification for Digital
Integrated Circuit Testing System

JJF XXXX—XXXX
代替
JJG 1015—2006

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

中国计量科学研究院

参加起草单位：中国船舶集团有限公司第七〇九研究所

杭州长川科技股份有限公司

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 洁（中国电子技术标准化研究院）

何 昭（中国计量科学研究院）

参加起草人：

黄智超（中国电子技术标准化研究院）

丁 超（中国船舶集团有限公司第七〇九研究所）

钟锋浩（杭州长川科技股份有限公司）

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.....	1
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
5 校准条件.....	2
5.1 环境条件.....	2
5.2 测量标准及其他设备.....	2
6 校准项目和校准方法.....	3
6.1 校准项目.....	3
6.2 校准方法.....	3
7 校准结果表达.....	8
8 复校时间间隔.....	9
附录 A 原始记录内页格式.....	10
附录 B 校准证书内页格式.....	13
附录 C 主要项目校准不确定度评定示例.....	16

引 言

JJF 1001-2021《通用计量术语及定义》、JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF1059.1-2019《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范编制工作的基础性系列规范。

本规范是对 JJG 1015-2006《通用数字集成电路测试系统检定规程》的修订，与 JJG 1015-2006 相比，除编辑性修改外，主要变化如下：

- 检定规程修改为校准规范；
- 增加了数字通道频率的校准方法；
- 系统时钟频率的测量范围从 100Hz~250MHz 修订为 10MHz、100MHz；
- 器件电源单元的电压测量范围从-50V~50V 修订为 $\pm(10\text{mV}\sim 50\text{V})$ ；
- 精密测量单元加压测流范围从-20V~20V， $\pm(100\text{nA}\sim 500\text{mA})$ 修订为 $\pm(10\text{mV}\sim 100\text{V})$ ， $\pm(100\text{nA}\sim 2\text{A})$ ；
- 精密测量单元加流测压测量范围从 $\pm(100\text{nA}\sim 500\text{mA})$ ，-20V~20V 修订为 $\pm(100\text{nA}\sim 2\text{A})$ ， $\pm(10\text{mV}\sim 100\text{V})$ ；
- 环境温湿度修改为 GJB 548C-2021 规定的温湿度。

本规范历次版本发布情况：

- JJG 1015-2006。

数字集成电路测试系统校准规范

1 范围

本规范适用于频率范围 1kHz~1.6GHz 数字集成电路测试系统的校准。

2 引用文件

GB/T 17574-1998 《半导体器件 集成电路 第 2 部分：数字集成电路》

GJB 548C-2021 《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和模拟集成电路测试系统，数字集成电路测试系统测试对象是数字信号集成电路器件。

数字集成电路测试系统的典型结构由数字部分及电源等辅助部分构成，包括驱动/比较单元、图形发生器、时钟发生器、器件电源、精密测量单元等部分。数字集成电路测试系统结构示意图，如图 1 所示。

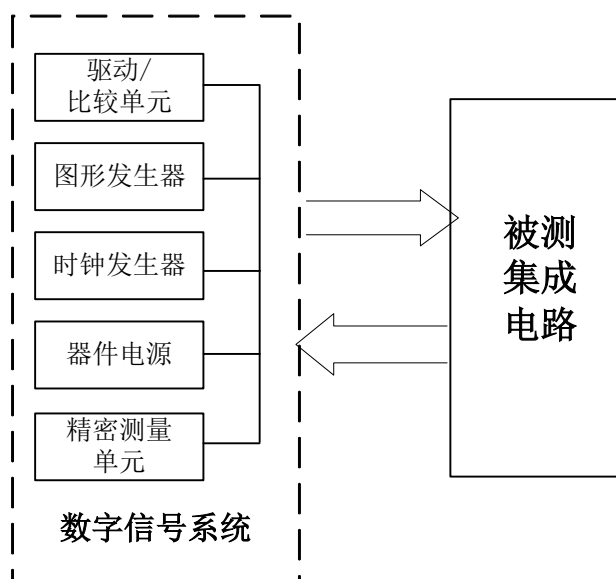


图 1 数字集成电路测试系统结构示意图

4 计量特性

4.1 系统时钟频率

频率：10MHz、100MHz，最大允许误差： $\pm 1 \times 10^{-6}$ 。

4.2 数字通道频率

范围：1kHz~1.6GHz，最大允许误差： $\pm 1 \times 10^{-5}$ 。

4.3 驱动单元

驱动电压范围：±（10mV~20V），最大允许误差：±10mV；

上升/下降时间：≤3.5ns；

通道间偏差：<2ns。

4.4 比较单元

电压测量范围：±（10mV~20V），最大允许误差：±10mV。

4.5 器件电源单元

电压范围：±（10mV~50V），最大允许误差：±0.05%；

电流范围：±（5μA~2A），最大允许误差：±0.5%。

4.6 精密测量单元

施加电压范围：±（10mV~100V），最大允许误差：±（0.5%~1%）；

电压测量范围：±（10mV~100V），最大允许误差：±（0.5%~1%）；

施加电流范围：±（100nA~2A），最大允许误差：±0.5%；

电流测量范围：±（100nA~2A），最大允许误差：±0.5%。

注：以上技术指标不作合格性判别，仅提供参考。

5 校准条件

5.1 环境条件

- 1) 环境温度：18℃~26℃；
- 2) 相对湿度：20%~80%；
- 3) 电源电压及频率：（220±11）V、（50±1）Hz；
- 4) 周围无影响正常工作的机械振动和电磁干扰。

5.2 测量标准及其他设备

5.2.1 直流电压源

直流电压范围：±（1mV~100V）

最大允许误差：±0.01%

5.2.2 直流电压表

直流电压范围：±（1mV~100V）

最大允许误差：±0.01%

5.2.3 频率计数器

频率范围：1kHz~1.6GHz

最大允许误差： $\pm 1 \times 10^{-7}$

5.2.4 数字示波器

带宽：大于 5GHz

幅值范围：1mV/div~1V/div

上升时间：优于 70ps。

5.2.5 标准电阻箱

范围：1Ω~1MΩ

最大允许误差： $\pm 0.1\%$

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	时钟	系统时钟频率
2	数字通道	数字通道频率
3	驱动单元	驱动单元电压
4		驱动单元上升/下降时间
5		驱动单元通道间偏差
6	比较单元	比较单元电压
7	器件电源单元	器件电源单元电压
8		器件电源单元电流
9	精密测量单元	精密测量单元加压测流
10		精密测量单元加流测压

6.2 校准方法

6.2.1 外观及工作正常性检查

检查系统正常工作所配套附件是否齐全。校准之前，全部系统及仪器进行外观正常性检查和通电检查，应能正常工作。按说明书要求预热，预热后，仪器运行系统自校准程序，系统显示均为合格状态。

6.2.2 系统时钟频率

系统时钟频率校准连接如图 1 所示，频率计对系统时钟频率进行校准。将频

率计与系统时钟输出相连接，用频率计读取频率值，记录于附录 A 表 A.1 中。

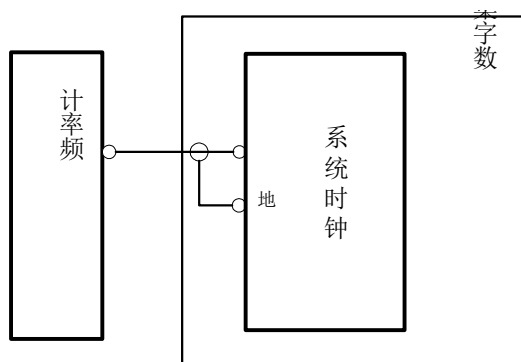


图 1 系统时钟频率校准连接图

6.2.3 数字通道频率

数字通道校准连接如图 2 所示，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。按技术说明书设置数字通道输出幅度（无要求时幅度选 1V），占空比为 50% 的方波信号。在数字通道频率范围内，输出包括高、中、低在内的至少 3 个频率点，用频率计分别读取频率值，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。

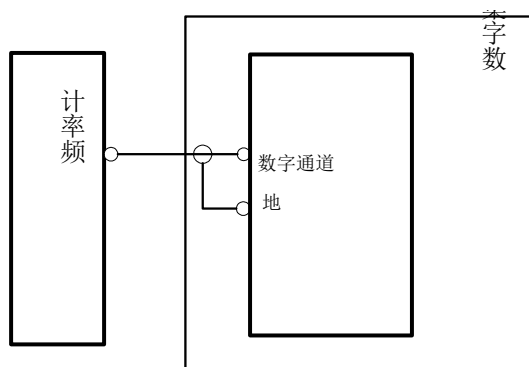


图 2 数字通道频率校准连接图

6.2.4 驱动单元电压

驱动单元电压校准连接如图 3 所示，将被校系统的驱动单元相应通道与直流电压表连接，驱动单元输出电压。在驱动单元电压量程范围内，驱动单元输出包括高、中、低在内的至少 3 个电压点，用直流电压表分别读取电压值，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。

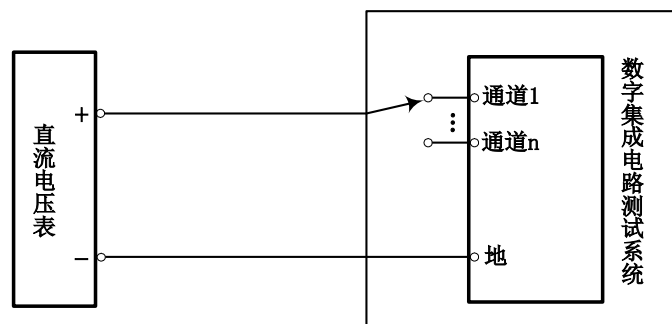


图3 驱动单元电压校准连接图

6.2.5 驱动单元上升时间/下降时间

驱动单元上升时间/下降时间校准连接如图4所示，将示波器的探头与被校准系统驱动单元通道相连接。驱动单元通道输出占空比50%的方波信号，按驱动单元技术说明书设置幅度（无要求时幅度选1V），用示波器分别测量脉冲上升电压幅度10%~90%之间的时间（上升时间），脉冲下降电压幅度90%~10%之间的时间（下降时间），记录于附录A表A.4中。对于多个驱动单元通道，重复以上校准步骤。

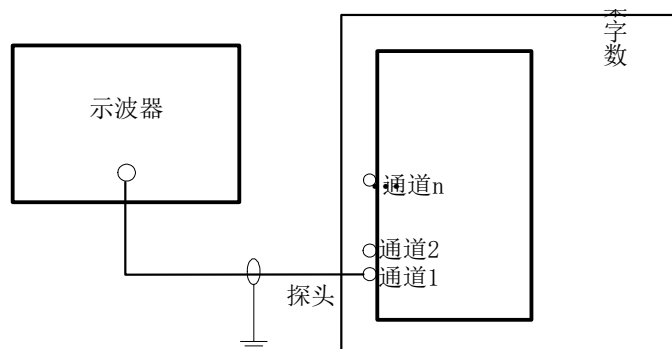


图4 驱动单元上升/下降时间校准连接图

6.2.6 驱动单元通道间偏差

驱动单元通道间偏差校准连接如图5所示，将示波器的两个探头分别与被校准系统驱动单元的两个通道相连接。驱动单元输出占空比为50%的方波信号，按技术说明书设置幅度（无要求时幅度选1V）。以任一通道的波形前沿中心点为参考，测量与另一个通道波形前沿中心点之间的偏差，将测量值中的最大值与最小值之差作为通道间偏差，记录于附录A表A.5中。

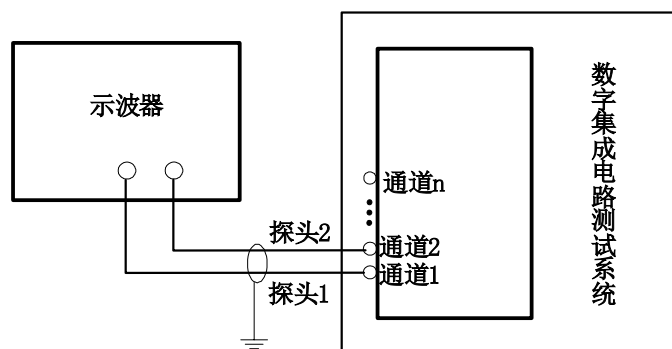


图5 驱动单元通道间偏差校准连接图

6.2.7 比较单元电压

比较单元电压校准连接如图6所示，将被校系统的比较单元通道与标准直流电压源相连接。在比较单元测量电压量程范围内，直流电压源输出包括高、中、低在内的至少3个电压点，被校系统测量电压源的电压读数，分别记录于附录A表A.6中。对于多个比较单元，重复以上校准步骤。

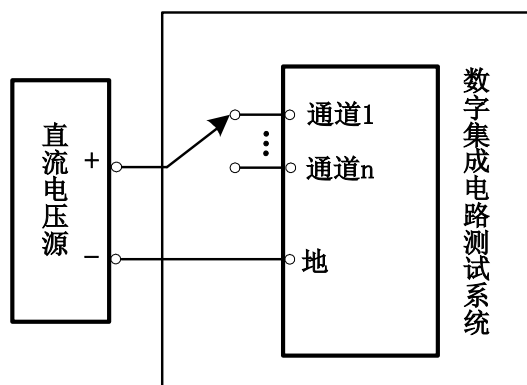


图6 比较单元电压校准连接图

6.2.8 器件电源单元电压

器件电源单元电压校准连接如图7所示，将被校系统的器件电源通道与直流电压表连接。在被校系统器件电源电压量程范围内，器件电源输出包括高、中、低在内的至少3个电压点，用直流电压表分别读取电压值，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。

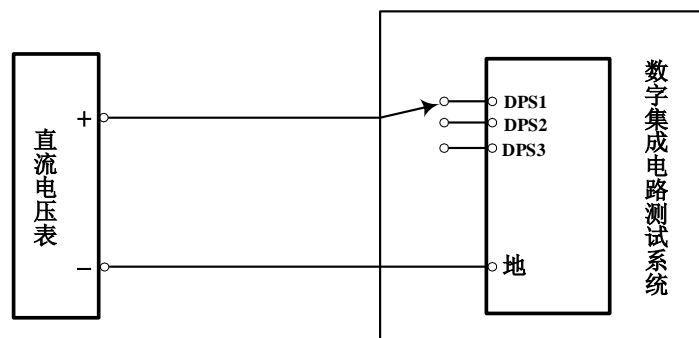


图7 器件电源单元电压校准连接图

6.2.9 器件电源单元电流

器件电源单元电流校准连接如图8所示,将被校系统的器件电源通道与标准电阻器和直流电压表相连接。根据器件电源电流的量值,结合标准电阻器的额定功率,选取适当的标准电阻器。在器件电源电流量程范围内,输出包括高、中、低在内的至少3个电流点,用直流电压表分别读取电压值,根据标准电阻器值,计算标准电流值,将读取的电压值和计算结果分别记录于附录A表A.8中。对于多个器件电源单元,重复以上校准步骤。

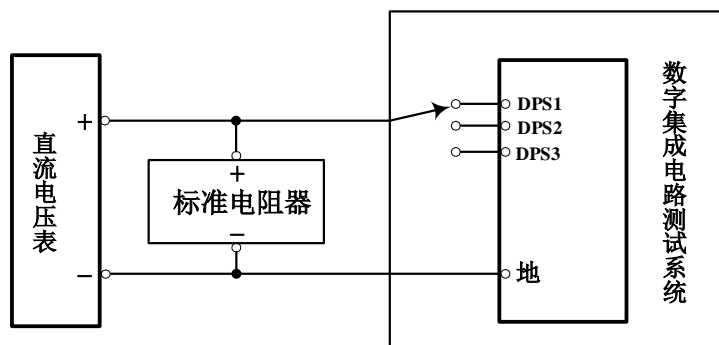


图8 器件电源单元电流校准连接图

6.2.10 精密测量单元加压测流

精密测量单元加压测流校准连接如图9所示,将被校系统的精密测量单元通道与直流电压表、标准电阻箱连接,设置精密测量单元为加压测流(FVMI)模式。在精密测量单元施加电压量程范围内,输出包括高、中、低在内的至少3个电压点,用直流电压表分别读取电压值,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。

在精密测量单元电流测量量程范围内,选取包括高、中、低在内的至少3个电流点。用直流电压表读取电压值,被校系统读取电流测量值,根据标准电阻值,计算标准电流值,将计算结果记录于附录A表A.10中。对于多个精密测量单元,

重复以上校准步骤。

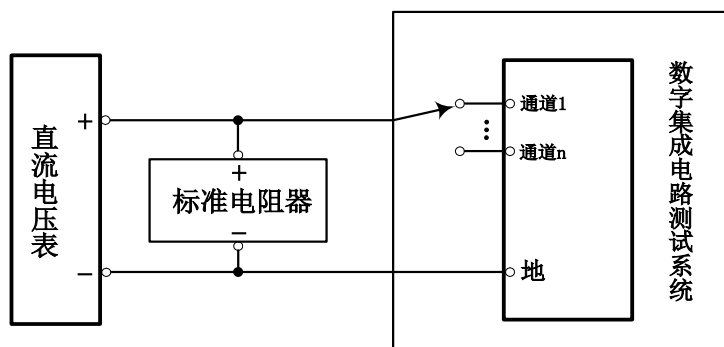


图9 精密测量单元加压测流校准连接图

6.2.11 精密测量单元加流测压

精密测量单元加流测压校准连接如图 10 所示，将被校系统的精密测量单元通道与标准电阻器和直流电压表连接，设置精密测量单元为驱动电流测量电压模式（FIMV），在精密测量单元施加电流量程范围内，输出包括高、中、低在内的至少 3 个电流点。用直流电压表读取电压值，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。

在精密测量单元电压测量量程范围内，选取包括高、中、低在内的至少 3 个电压点。同时用精密测量单元和直流电压表分别测量电压值，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。

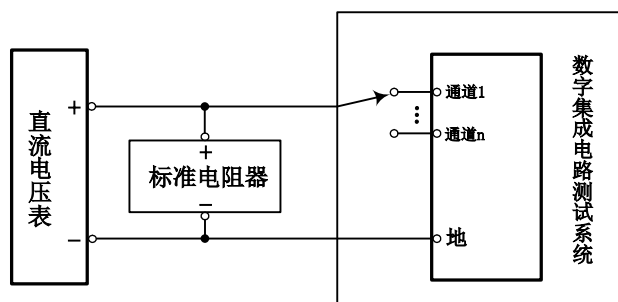


图 10 精密测量单元加流测压校准连接图

7 校准结果表达

数字集成电路测试系统校准后，出具校准证书，证书至少包括以下信息：

- 标题：“校准证书”；
- 实验室名称和地址；
- 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- 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。

8 复校时间间隔

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定, 推荐为 1 年。

附录 A 原始记录内页格式

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

标称值	实测值	不确定度 $k=2$

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 驱动单元上升/下降时间

驱动信号	实测值		不确定度 $k=2$
	上升时间	下降时间	

表 A.5 驱动单元通道间偏差

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 A.6 比较单元电压

标准设置值	系统测量值	不确定度 $k=2$

表 A.7 器件电源单元电压

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 A.8 器件电源单元电流

标准电阻	实测电压值	系统测量电流值	标准电流值	不确定度 $k=2$

表 A.9 精密测量单元加压测流施加电压

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 A.10 精密测量单元加压测流电流测量

标准电阻	实测电压值	系统设置电流值	标准电流值	不确定度 $k=2$

表 A.11 精密测量单元加流测压施加电流

标准电阻	实测电压值	系统设置电流值	标准电流值	不确定度 $k=2$

表 A.12 精密测量单元加流测压电压测量

系统测量值	实测值	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 $k=2$

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 驱动单元上升/下降时间

驱动信号	实测值		不确定度 $k=2$
	上升时间	下降时间	

表 B.5 驱动单元通道间偏差

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.6 比较单元电压

标准设置值	系统测量值	不确定度 $k=2$

表 B.7 器件电源单元电压

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.8 器件电源单元电流

系统测量值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.9 精密测量单元加压测流施加电压

设置值	实测值	不确定度 $k=2$

表 B.10 精密测量单元加压测流电流测量

标准电阻	实测电压值	系统设置电流值	标准电流值	不确定度 $k=2$

表 B.11 精密测量单元加流测压施加电流

标准电阻	实测电压值	系统设置电流值	标准电流值	不确定度 $k=2$

表 B.12 精密测量单元加流测压电压测量

系统测量值	实测值	不确定度 $k=2$

附录 C 主要项目校准不确定度评定示例

C.1 数字通道频率校准不确定度

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端,由频率计读取频率值。

C.1.2 测量模型

$$f=f_0$$

(C.1)

式中

f —被校数字集成电路测试系统频率设置值;

f_0 —频率计测量值。

不确定度来源:

- 1) 频率计频率测量准确度引入的不确定度 u_1 ;
- 2) 频率计显示分辨力引入的不确定度 u_2 ;
- 3) 频率计测量重复性引入的不确定度 u_3 。

C.1.3 不确定度评定

- 1) 频率计频率测量准确度引入的不确定度

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, $k=\sqrt{3}$, 由此引入的标准不确定度为 $u_1=a_1/k=1 \times 10^{-7} / \sqrt{3}=5.8 \times 10^{-8}$ 。

- 2) 频率计显示分辨力引入的不确定度

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 1×10^{-9} , 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为 $u_2 = a_2/k = 1 \times 10^{-9} / \sqrt{3} = 5.8 \times 10^{-10}$ 。

- 3) 频率计测量重复性引入的不确定度

使用频率计对 1GHz 的输出频率进行 10 次测量,测量数据如表 C.1 所示。

表 C.1 频率测量数据

测量次数	实测值(GHz)
------	----------

1	0.9999998
2	0.9999998
3	0.9999998
4	0.9999997
5	0.9999998
6	0.9999997
7	0.9999998
8	0.9999997
9	0.9999998
10	0.9999997

单次测量结果的实验标准差为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 5.2 \times 10^{-8} \text{GHz}$$

测量重复性引入的不确定度为 $u_3 = s/\sqrt{n} = 5.2 \times 10^{-8}$ 。

C.1.4 不确定度合成

各标准不确定度见表 C.2。

表 C.2 频率校准不确定度分量表

不确定度来源	符号	评定方法	分布	包含因子	标准不确定度
频率计频率测量准确度	u_1	B	均匀	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-8}
频率计显示分辨率	u_2	B	均匀	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-10}
频率计测量重复性	u_3	A	—	—	5.2×10^{-8}

以上各分量之间独立不相关，显示分辨率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 $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 7.8 \times 10^{-8}$ 。

C.1.5 扩展不确定度

包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 1.6×10^{-7} 。

C.2 上升时间校准不确定度

C.2.1 测量方法

驱动信号的上升时间校准为直接测量法，将被校系统的一个数字驱动信号通道与示波器相连接，驱动单元输出幅度为 1V 的方波信号。

C.2.2 测量模型

$$t=t_0$$

(C.2)

式中

t —被校数字集成电路测试系统驱动信号的上升时间

t_0 —示波器测量值

不确定度来源：

- 1) 测量重复性引入的不确定度 u_1 ;
- 2) 示波器电压测量不准引入的不确定度 u_2 ;
- 3) 示波器的时间测量不准引入的不确定度 u_3 。

C.2.3 不确定度评定

- 1) 测量重复性引入的不确定度

以电压幅度为 1V、频率为 1GHz 的方波信号为例,进行连续 10 次独立测量,测量数据见表 C3。

表 C.3 上升时间测量数据

测量次数	实测值 (ns)
1	0.348
2	0.347
3	0.348
4	0.347
5	0.346
6	0.348
7	0.347
8	0.347
9	0.346
10	0.346

单次测量结果的实验标准差为 0.0002ns, 标准不确定度用实验标准差表示, 则 u_1 为 0.0002ns。

- 2) 示波器电压测量不准引入的不确定度

示波器 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 0.35ns 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 1ps, 引入的不确定度为 $u_2 = \frac{1\text{ps}}{\sqrt{3}}$

=0.6ps。

3) 示波器的时间测量不准引入的不确定度

根据示波器 DSA70804B 的技术指标，其时间测量的最大允许误差为 0.5%，

由示波器时间测量不准引入的不确定度为 $u_3 = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} \times 0.35\text{ns} = 1\text{ps}$ 。

C.2.4 不确定度合成

各标准不确定度分量见表 C4。

表 C.4 上升时间校准不确定度分量表

不确定度来源	符号	评定方法	分布	包含因子	标准不确定度
测量重复性	u_1	A 类	—	—	0.2ps
示波器电压测量不准	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.6ps
示波器的时间测量不准	u_3	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	1ps

以上各分量之间独立不相关，合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 2\text{ps}$ 。

C.2.5 扩展不确定度

包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 4ps，相对扩展不确定度为 1.2%。