



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—XXXX

片上系统集成电路测试系统校准规范

Calibration Specification of System-on-Chip (SoC) 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

片上系统集成电路测试系统校准规范
Calibration Specification for System-on-Chip
(SoC) 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：中国船舶集团有限公司第七〇九研究所
中国电子技术标准化研究院

参加起草单位：悦芯科技股份有限公司

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：

XXX（中国船舶集团有限公司第七〇九研究所）
XXX（中国船舶集团有限公司第七〇九研究所）
XXX（中国电子技术标准化研究院）

参加起草人：

XXX（中国船舶集团有限公司第七〇九研究所）
XXX（悦芯科技股份有限公司）

目 录

引 言	III
1 范围	1
2 术语	1
2.1 片上系统 (System on Chip, SoC)	1
3 概述	1
3.1 原理	1
3.2 结构	1
3.3 用途	2
4 计量特性	2
4.1 系统时钟单元参数	2
4.2 时钟单元参数	2
4.3 驱动器参数	2
4.4 比较器参数	2
4.5 管脚参数测量单元参数	2
4.6 高精度参数测量单元参数	2
4.7 器件供电电源参数	2
4.8 波形设置单元参数	3
4.9 波形数字化单元参数	3
5 校准条件	3
5.1 环境条件	3
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 校准方法	4
7 校准结果表达	18
8 复校时间间隔	18
附录 A 原始记录内页格式	19
附录 B 校准证书内页格式	23

附录 C 主要项目不确定度评定示例 27

引言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、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》共同构成支撑本规范编制工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

片上系统集成电路测试系统校准规范

1 范围

本规范适用于片上系统集成电路测试系统的校准。

2 术语

下列术语适用于本规范：

2.1 片上系统（System on Chip, SoC）

将完整系统集成到单个芯片的系统级芯片。

3 概述

3.1 原理

SoC 集成电路测试系统是通过向芯片施加预设的输入信号，并检测输出信号是否与预期一致，从而验证其功能、时序、功耗等指标。

3.2 结构

SoC 集成电路测试系统的典型结构由工作站、主机柜和测试头等构成，其中，工作站作为测试软件的载体，用于对电平、时序、向量等进行设置；主机柜是连接工作站与测试头的核心枢纽，主要负责资源集中管理、信号分配、电源供给及系统散热；测试头直接连接被测芯片，集成信号生成、测量及电源等核心资源，实现对芯片输入/输出信号的高精度控制和响应采集。测试头主要包括系统时钟单元、时间测量单元、驱动器、比较器、管脚参数测量单元、高精度参数测量单元、器件供电电源、波形设置单元、波形数字化单元等资源单元。其结构组成如图 1 所示。

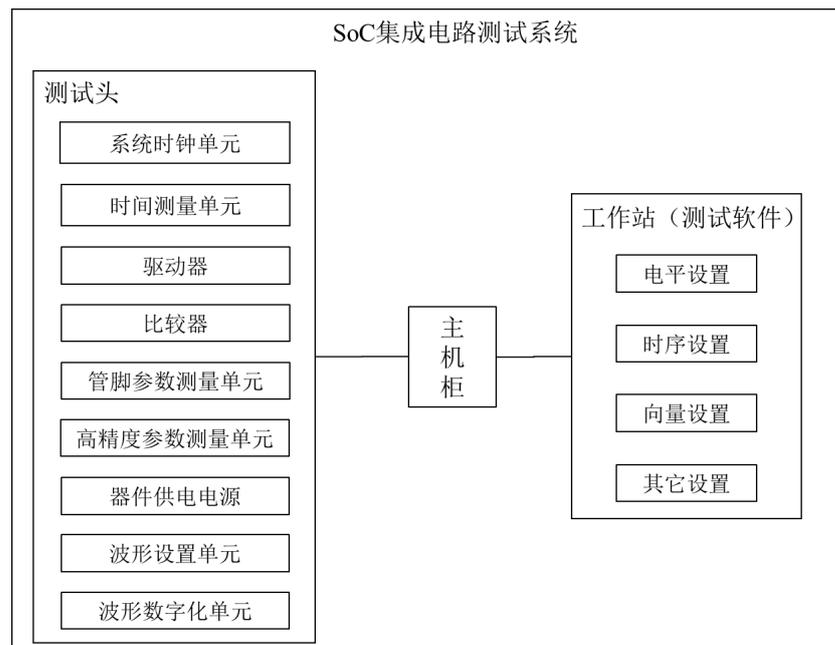


图 1 SoC 集成电路测试系统结构组成图

3.3 用途

SoC 集成电路测试系统主要用于数字及混合信号电路的测试，在集成电路生产测试、验证测试、性能测试、器件筛选、测试技术研究等方面应用广泛。

4 计量特性

4.1 系统时钟单元参数

4.1.1 参考时钟频率

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

4.2 时钟单元参数

4.2.1 时间测量单元频率测量

频率测量范围：10kHz~4GHz，最大允许误差： $\pm 2 \times 10^{-5}$

4.3 驱动器参数

4.3.1 测试速率

速率范围：200Mbps~8Gbps，最大允许误差： $\pm 2 \times 10^{-5}$

4.3.2 驱动器电压输出

电压输出范围：-1.5V~6.5V，最大允许误差： $\pm 10\text{mV}$

4.3.3 驱动器抖动输出

抖动输出范围：100ps~400ps，最大允许误差： $\pm 5\%$

4.3.4 驱动器上升/下降时间

时间范围：20ps~1ns

4.4 比较器参数

4.4.1 比较器电压测量

电压测量范围：-1.5V~6.5V，最大允许误差： $\pm 10\text{mV}$

4.5 管脚参数测量单元参数

4.5.1 管脚参数测量单元电压输出/测量

输出/测量范围：-2.0V~6.5V，最大允许误差： $\pm(4\sim 10)\text{mV}$

4.5.2 管脚参数测量单元电流输出/测量

输出/测量范围： $\pm(2\mu\text{A}\sim 50\text{mA})$ ，最大允许误差： $\pm(0.5\%\sim 1\%)$

4.6 高精度参数测量单元参数

4.6.1 高精度参数测量单元电压输出/测量

输出/测量范围：-2.0V~6.5V，最大允许误差： $\pm(3\sim 8)\text{mV}$

4.6.2 高精度参数测量单元电流输出/测量

输出/测量范围： $\pm(1\mu\text{A}\sim 200\text{mA})$ ，最大允许误差： $\pm(0.2\%\sim 1\%)$

4.7 器件供电电源参数

4.7.1 器件供电电源电压输出

电压输出范围：-8V~8V，最大允许误差： $\pm 5\text{mV}$

4.7.2 器件供电电源电流测量

电流测量范围： $\pm(10\mu\text{A}\sim 4\text{A})$ ，最大允许误差： $\pm(0.2\%\sim 1\%)$

4.8 波形设置单元参数

4.8.1 波形设置单元幅度输出

幅度输出范围： $\pm(200\text{mV}\sim 4\text{V})$ ，最大允许误差： $\pm(5\%\sim 10\%)$

4.8.2 波形设置单元频率输出

频率输出范围： $10\text{kHz}\sim 20\text{MHz}$ ，最大允许误差： $\pm(0.1\%\sim 0.5\%)$

4.9 波形数字化单元参数

4.9.1 波形数字化单元幅度测量

幅度测量范围： $\pm(200\text{mV}\sim 3\text{V})$ ，最大允许误差： $\pm(5\%\sim 10\%)$

4.9.2 波形数字化单元频率测量

频率测量范围： $10\text{kHz}\sim 20\text{MHz}$ ，最大允许误差： $\pm(0.1\%\sim 0.5\%)$

注：因不同被校设备的性能指标各不相同，具体的计量特性（参数项目、量程范围、最大允许误差等），应以被校设备生产厂家的技术手册及该设备的具体选件配置为参考。

5 校准条件

5.1 环境条件

- 1) 环境温度： $(23\pm 5)^\circ\text{C}$ ；
- 2) 相对湿度： $\leq 80\%$ ；
- 3) 供电电源： $(220\pm 11)\text{V}$ ， $(50\pm 1)\text{Hz}$ ；
- 4) 无影响仪器正常工作的电磁干扰及机械振动；
- 5) 操作人员在校准过程中应符合设备防静电要求。

5.2 校准用设备

5.2.1 直流电压表

直流电压范围： $\pm(10\text{mV}\sim 10\text{V})$ ，最大允许误差： $\pm 0.01\%$

输入阻抗范围： $\geq 1\text{G}\Omega$

5.2.2 函数发生器

输出频率范围： $10\text{kHz}\sim 5\text{GHz}$ ，最大允许误差： $\pm 2\times 10^{-6}$

输出幅度范围： $100\text{mV}\sim 5\text{V}$ ，最大允许误差： $\pm 5\%$

5.2.3 频率计

频率范围： $1\text{kHz}\sim 5\text{GHz}$ ，最大允许误差： $\pm 2\times 10^{-7}$

5.2.4 数字示波器

幅度测量范围： $\pm(100\text{mV}\sim 5\text{V})$ ，最大允许误差： $\pm 2\%$

上升/下降时间范围： $\geq 20\text{ps}$ ，最大允许误差： $\pm(5\%\sim 10\%)$

抖动测量范围： $100\text{ps}\sim 1\text{ns}$ ，最大允许误差： $\pm(1\text{ps}\sim 10\text{ps})$

5.2.5 标准电阻

电阻范围： $0.1\Omega\sim 10\text{M}\Omega$ ，准确度等级：0.01

额定功率范围： $\geq 1\text{W}$

5.2.6 校准适配板

为厂家根据不同型号进行配备，用于将各通道资源引出。

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目如表 1 所示。

表 1 校准项目表

序号	资源单元名称	项目名称	校准方法条款
1	系统时钟单元	参考时钟频率	6.2.2
2	时间测量单元	时间测量单元频率测量	6.2.3
3	驱动器	测试速率	6.2.4
4		驱动器电压输出	6.2.5
5		驱动器抖动输出	6.2.6
6		驱动器上升/下降时间	6.2.7
7	比较器	比较器电压测量	6.2.8
8	管脚参数测量单元	管脚参数测量单元电压输出	6.2.9
9		管脚参数测量单元电流测量	6.2.10
10		管脚参数测量单元电流输出	6.2.11
11		管脚参数测量单元电压测量	6.2.12
12	高精度参数测量单元	高精度参数测量单元电压输出	6.2.9
13		高精度参数测量单元电流测量	6.2.10
14		高精度参数测量单元电流输出	6.2.11
15		高精度参数测量单元电压测量	6.2.12
16	器件供电电源	器件供电电源电压输出	6.2.13
17		器件供电电源电流测量	6.2.14
18	波形设置单元	波形设置单元幅度输出	6.2.15
19		波形设置单元频率输出	6.2.16
20	波形数字化单元	波形数字化单元幅度测量	6.2.17
21		波形数字化单元频率测量	6.2.18

6.2 校准方法

6.2.1 外观、附件及工作正常性检查

被校测试系统的外观应完好，各开关、按键等调节正常，不应有影响电气性能的机械损伤，相关控制旋钮、按键等有明确的标志。被校测试系统应有说明书和配套附件，应配备相应的校准适配板。

被校测试系统按技术说明书规定时间预热，预热后应显示正常；具备自校准功能的应先进行自校准（包括功能诊断、内部参考检查、自校准等），结果应正常。将测试结果记录到附录 A 表 A.1 中。

6.2.2 参考时钟频率

按图 2 连接校准所需设备。

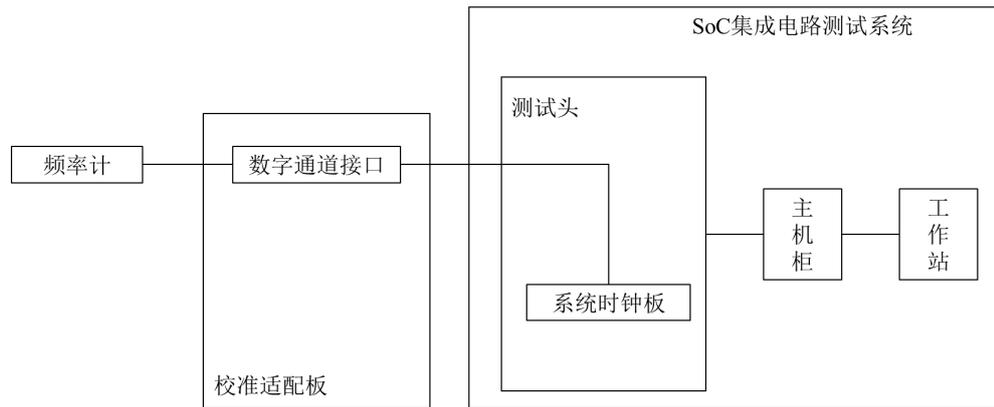


图 2 参考时钟频率参数校准连接图

- a) 将校准适配板安装到测试系统的测试头上，将频率计通过同轴电缆与数字通道接口连接；
- b) 在系统中设置输出系统参考时钟信号（频率 f_{R-S} 一般为 10MHz）到选取的数字通道上，用频率计测量该信号的频率值为 f_{R-M} ；
- c) 按照公式(1)计算系统参考时钟频率的误差，将计算结果记录到附录 A 表 A.2 中：

$$\Delta f_R = f_{R-S} - f_{R-M} \quad (1)$$

式中：

Δf_R 为系统参考时钟频率的误差，赫兹（Hz）；

f_{R-S} 为系统输出参考时钟信号的设定值，赫兹（Hz）；

f_{R-M} 为频率计测得的频率值，赫兹（Hz）。

6.2.3 时间测量单元频率测量

按图 3 连接校准所需设备。

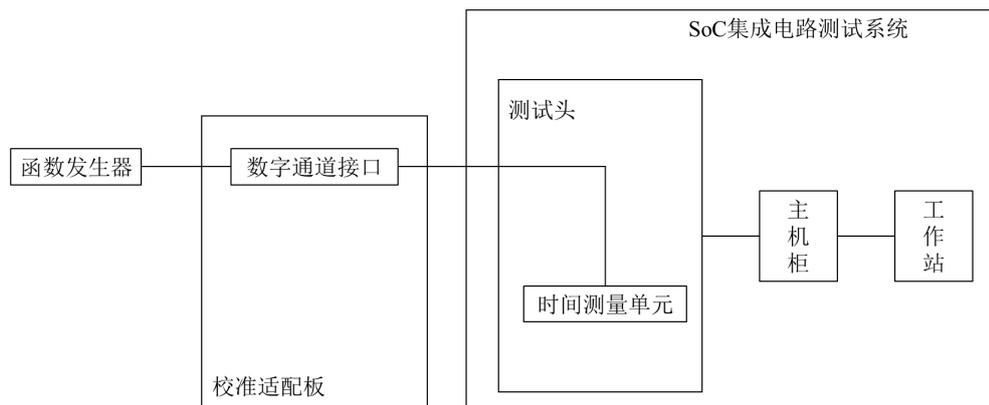


图 3 时间测量单元频率测量参数校准连接图

- a) 将校准适配板安装到测试系统的测试头上，函数发生器的信号通道与校准适配板的数字通道接口连接；
- b) 通过函数发生器输出幅度为 U_{TMU-M} （典型值，如 0.5V）、频率为 f_{TMU-M} （一般为

每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）的方波信号；

c) 通过系统时间单元测量选取数字通道上的方波信号频率 $f_{\text{TMU-S}}$ 。

d) 按照公式(2)计算时间测量单元频率测量参数的误差，将计算结果记录到附录 A 表 A.3 中：

$$\Delta f_{\text{TMU}} = f_{\text{TMU-M}} - f_{\text{TMU-S}} \quad (2)$$

式中：

Δf_{TMU} 为时间测量单元频率测量的误差，赫兹（Hz）；

$f_{\text{TMU-S}}$ 为测试系统时间测量单元测得的频率值，赫兹（Hz）；

$f_{\text{TMU-M}}$ 为函数发生器输出信号的频率值，赫兹（Hz）。

e) 重复上述步骤，完成对其它时间测量单元频率测量校准点的校准。

6.2.4 测试速率

按图 4 连接校准所需设备。

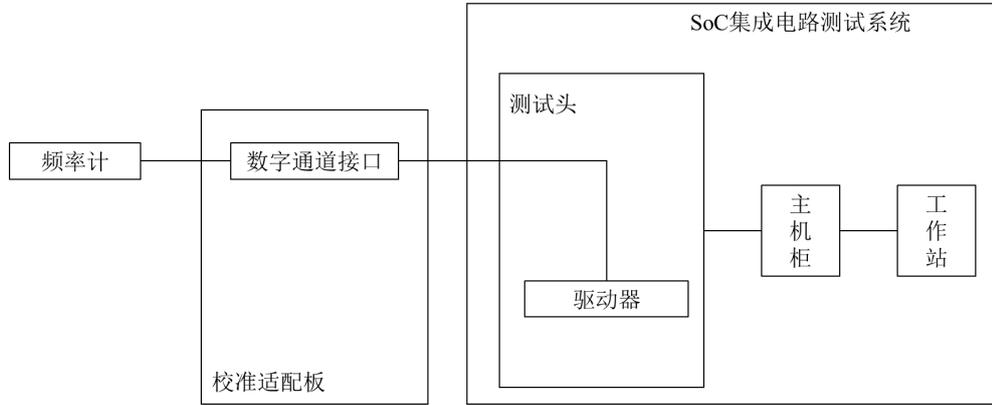


图 4 数据传输速率参数校准连接图

a) 将校准适配板安装到测试头上，通过同轴电缆将频率计与校准适配板上的数字通道接口连接；

b) 在系统中设置输出速率为 $v_{\text{DV-S}}$ （一般为测试系统的测试速率上限，如 8Gbps、1.6Gbps）的数字信号到选取的数字通道上；

c) 利用频率计测量输出数字信号的频率值为 $f_{\text{DV-M}}$ ；

d) 计算得出数字信号的速率 $v_{\text{DV-M}}$ 为频率值的两倍（一个信号周期内含有两个数据位），即 $v_{\text{DV-M}} = 2f_{\text{DV-M}}$ ；

e) 按照公式(3)计算测试速率的误差，将计算结果记录到附录 A 表 A.4 中：

$$\Delta v_{\text{DV}} = v_{\text{DV-S}} - v_{\text{DV-M}} \quad (3)$$

式中：

Δv_{DV} 为测试速率的误差，比特每秒（bps）；

$v_{\text{DV-S}}$ 为系统设定输出数字信号的速率值，比特每秒（bps）；

$v_{\text{DV-M}}$ 为频率计测得数字信号的速率值，比特每秒（bps）。

6.2.5 驱动器电压输出

按图 5 连接校准所需设备。

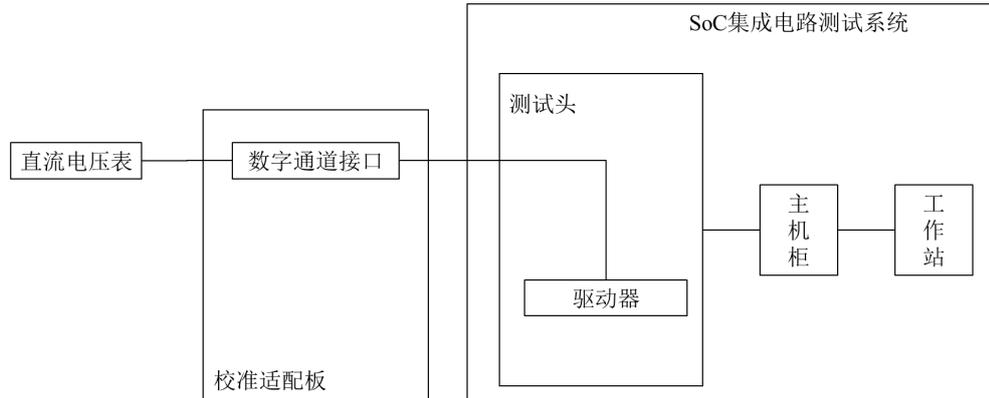


图 5 驱动器电压输出参数校准连线图

- 将校准适配板安装到测试头上，驱动器通道接口与直流电压表连接；
- 根据驱动器输出电压参数校准点，设置系统驱动器单元输出电压 U_{DU-S} （一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）的直流信号；
- 用直流电压表测量驱动器通道接口的电压值为 U_{DU-M} ；
- 按照公式(4)计算，将测量结果及误差记录在附录 A 表 A.5 中：

$$\Delta U_{DU} = U_{DU-S} - U_{DU-M} \quad (4)$$

式中：

ΔU_{DU} 驱动器电压输出的误差，伏特（V）；

U_{DU-S} 为系统驱动器电压输出的设定值，伏特（V）；

U_{DU-M} 为直流电压表测得的电压值，伏特（V）。

- 重复上述步骤，完成对其它驱动器电压输出校准点的校准。

6.2.6 驱动器抖动输出

按图 6 连接校准所需设备。

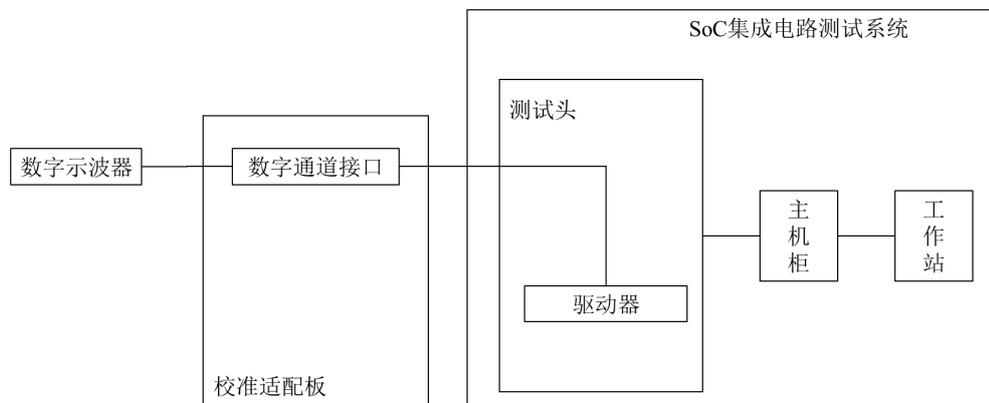


图 6 驱动器抖动输出参数校准连线图

- 将校准适配板安装到测试头上，将被校系统的数字通道接口通过同轴线路与数字示波器相连接；

b) 根据驱动器抖动输出校准点，设置系统输出频率为 f_{DJ-S} （一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）、抖动值为 J_{DJ-S} （一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）的抖动信号到选取的数字通道接口上；

c) 用数字示波器的抖动功能测量该数字通道接口上的抖动信号，测量得到其确定性抖动值为 J_{DJ-M} ；

d) 按照公式(5)计算，将测量结果及误差记录在附录 A 表 A.6 中：

$$\Delta J_{DJ} = J_{DJ-S} - J_{DJ-M} \quad (5)$$

式中：

ΔJ_{DJ} 为驱动器抖动输出的误差，秒（s）

J_{DJ-S} 为系统驱动器抖动输出的设定值，秒（s）；

J_{DJ-M} 为数字示波器测得的抖动值，秒（s）。

e) 重复上述步骤，完成对其它驱动器抖动输出校准点的校准。

6.2.7 驱动器上升/下降时间

按图 7 连接校准所需设备。

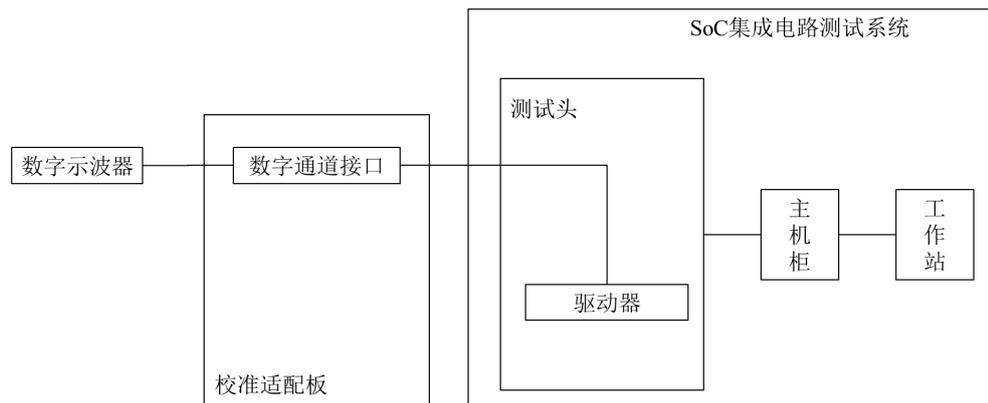


图 7 驱动器上升/下降时间参数校准连线图

a) 将校准适配板安装到测试头上，通过同轴线缆（满足信号带宽要求，如 SMA 同轴线）将校准适配板上的数字通道接口与数字示波器的通道相连接；

b) 设置系统的驱动器输出幅值为 U_{DR-S} （根据被校系统的技术手册选取典型值，如 1V）、速率为 v_{DR-S} （一般选取被校系统能够达到的最大测试速率，如 1.6Gbps、8Gbps）的方波信号；

c) 如果被校系统输出的方波信号为单端信号，则选取数字示波器的某一个通道与校准适配板上的某个数字通道接口相连接；如果被校系统输出的方波信号为差分信号，则需要将数字示波器上的两个通道分别与校准适配板上的两个数字通道接口相连接；

d) 根据厂家规定设置数字示波器的上升/下降时间测量的参数（如将上升时间定义的幅值变化区间设置为 20%~80%或 10%~90%）；

e) 对于单端信号，直接测得其上升时间 t_{r-S} 和下降时间 t_{f-S} ；对于差分信号，则利用

数字示波器的数学函数功能对两通道的差分信号进行减法（Ch1-Ch2）处理，测量处理后的信号波形的上升时间 $t_{r,D}$ 和下降时间 $t_{f,D}$ ，将测量结果记录在附录 A 表 A.7 中。

6.2.8 比较器电压测量

校准比较器电压测量参数即是对其输出高电平（ U_{OH} ）、输出低电平（ U_{OL} ）进行校准，按图 8 连接校准所需设备。

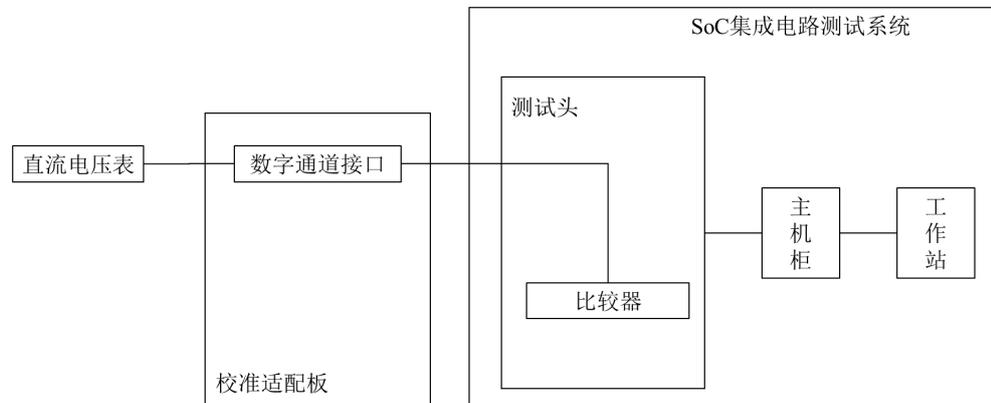


图 8 比较器电压测量参数校准连线图

a) 将校准适配板安装到测试头上，将校准适配板的数字通道接口与直流电压表连接；

b) 设置系统的数字通道为输出通道或双向通道，用高精度参数测量单元驱动电压作为比较器的输入信号，同时也将该信号输出到数字通道接口上；

c) 系统设置比较器的输出高电平（一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）为 U_{OH} ，设高精度参数测量单元的驱动电压初始值大于 U_{OH} ，按一微小步长（通常将高精度参数测量单元的分辨率作为微小步长）逐渐减小，执行功能测试，并用直流电压表测量高精度参数测量单元的驱动电压；

d) 当功能测试的结果从“通过”跳变为“不通过”，直流电压表测得跳变点处前后两个点的驱动电压，取更接近 U_{OH} 的电压值作为比较器测量高电平 U_{OH-S} ；

e) 按照公式(6)计算，将测量结果及误差记录在附录 A 表 A.8 中：

$$\Delta U_{OH} = U_{OH-S} - U_{OH-M} \quad (6)$$

式中：

ΔU_{OH} 为比较器输出高电平的误差，伏特（V）；

U_{OH-M} 为直流电压表测得的电压值，伏特（V）；

U_{OH-S} 为系统设置的比较器输出高电平，伏特（V）。

f) 重复上述步骤，完成对其它比较器输出高电平校准点的校准；

g) 系统设置比较器的输出低电平（一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）为 U_{OL} ，设高精度参数测量单元的驱动电压初始值小于 U_{OL} ，按一微小步长（通常将高精度参数测量单元的分辨率作为微小步长）逐渐增大，执行功能测试，并用直流电压表测量高精度参数测量单元的驱动电压；

h) 当功能测试的结果从“通过”跳变为“不通过”，直流电压表测得跳变点处前后两个点的驱动电压，取更接近 U_{OL} 的电压值作为比较器输出低电平 U_{OH-L} ；

i) 按照公式(7)计算，将测量结果及误差记录在附录 A 表 A.8 中：

$$\Delta U_{OL} = U_{OL-S} - U_{OL-M} \quad (7)$$

式中：

ΔU_{OL} 为比较器输出低电平的误差，伏特（V）；

U_{OL-M} 为直流电压表测得的电压值，伏特（V）；

U_{OL-S} 为系统比较器设置的输出低电平，伏特（V）。

j) 重复上述步骤，完成对其它比较器输出低电平校准点的校准。

6.2.9 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压输出

管脚参数测量单元与高精度参数测量单元的电压输出参数校准方法相同，校准设备连接示意图如图 9 所示。

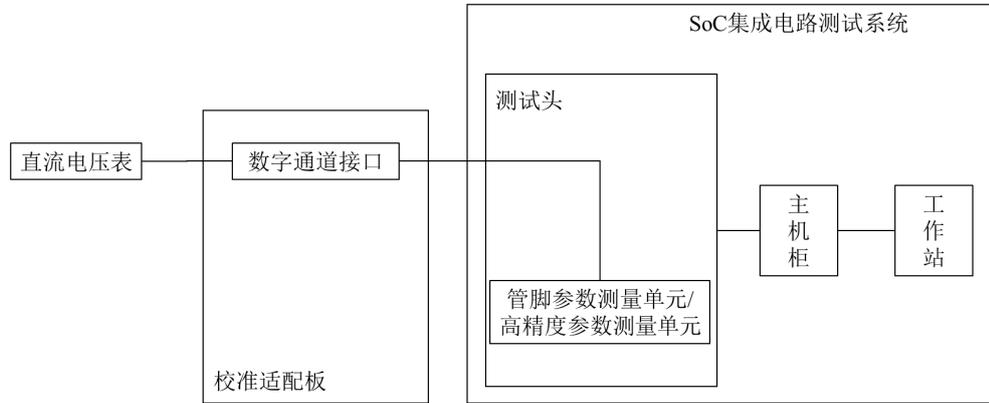


图 9 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压输出参数校准连线图

a) 将校准适配板安装到测试头上，校准适配板的数字通道接口与直流电压表连接；

b) 设置管脚参数测量单元/高精度参数测量单元的工作模式为加压测流（FVMI）模式，按照管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压输出参数的校准点设置施加电压（一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）为 $U_{F-PMU-S}$ ，将该信号输出到选取的数字通道接口上；

c) 用直流电压表测量数字通道接口的电压值为 $U_{F-PMU-M}$ ；

d) 按照公式(8)计算管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压输出的误差，将测量结果记录在附录 A 表 A.9 中：

$$\Delta U_{F-PMU} = U_{F-PMU-S} - U_{F-PMU-M} \quad (8)$$

式中：

ΔU_{F-PMU} 为管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压输出的误差，伏特（V）；

$U_{F-PMU-S}$ 为管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压输出的设定值，伏特（V）；

$U_{F-PMU-M}$ 为直流电压表测得的电压值，伏特（V）。

e) 重复上述步骤，完成对其它管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压输出校

准点的校准。

6.2.10 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流测量

管脚参数测量单元与高精度参数测量单元的电流测量参数校准方法相同，校准设备连接示意图如图 10 所示。

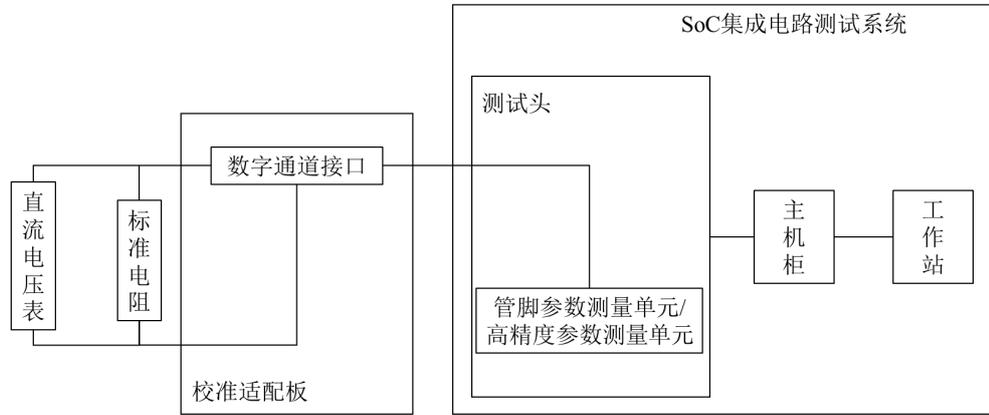


图 10 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流测量参数校准连线图

a) 将校准适配板安装到测试头上，校准适配板的数字通道接口与直流电压表、标准电阻连接，用直流电压表测量标准电阻两端的电压；

b) 设置管脚参数测量单元/高精度参数测量单元为加压测流（FVMI）模式，选取合适的标准电阻 R_{F-PMU} （标准电阻两端的电压不宜超过系统的施加电压量程，推荐范围为 100mV~1V），按照电流测量的校准点（一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）计算出相应的电压值，作为系统管脚参数测量单元/高精度参数测量单元的施加电压 U_{F-PMU} ，并输出到选取的数字通道接口上；

c) 用直流电压表测量标准电阻两端的电压值为 $U_{F-PMU-M}$ ；

d) 系统测得管脚参数测量单元/高精度参数测量单元的电流为 $I_{F-PMU-S}$ ；

e) 按照公式(9)计算管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流测量参数的误差，将测量结果记录在附录 A 表 A.10 中：

$$\Delta I_{F-PMU} = I_{F-PMU-S} - \frac{U_{F-PMU-M}}{R_{F-PMU}} \quad (9)$$

式中：

ΔI_{F-PMU} 为管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流测量的误差，安培（A）；

$I_{F-PMU-S}$ 为管脚参数测量单元/高精度参数测量单元的电流测量值，安培（A）；

$U_{F-PMU-M}$ 为直流电压表测得的电压值，伏特（V）；

R_{F-PMU} 为标准电阻值，欧姆（ Ω ）。

f) 重复上述步骤，完成对其它管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流测量校准点的校准。

6.2.11 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流输出

管脚参数测量单元与高精度参数测量单元的电流输出参数校准方法相同，校准设备连接示意图如图 10 所示，校准步骤如下：

a) 将校准适配板安装到测试头上，校准适配板的数字通道接口与直流电压表、标准电阻连接，用直流电压表测量标准电阻两端的电压；

b) 设置管脚参数测量单元/高精度参数测量单元为加流测压（FIMV）模式，选取合适的标准电阻 R_{M-PMU} （标准电阻两端的电压不宜超过系统的施加电压量程，推荐范围为 100mV~1V），按照电流测量的校准点（一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点），设置系统管脚参数测量单元/高精度参数测量单元的施加电流 $I_{M-PMU-S}$ ，并输出到选取的数字通道接口上；

c) 用直流电压表测量标准电阻两端的电压值为 $U_{M-PMU-M}$ ；

d) 按照公式(10)计算管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流输出参数的误差，将测量结果记录在附录 A 表 A.11 中：

$$\Delta I_{M-PMU} = I_{M-PMU-S} - \frac{U_{M-PMU-M}}{R_{M-PMU}} \quad (10)$$

式中：

ΔI_{M-PMU} 为管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流输出的误差，安培（A）；

$I_{M-PMU-S}$ 为管脚参数测量单元/高精度参数测量单元输出电流的设定值，安培（A）；

$U_{M-PMU-M}$ 为直流电压表测得的电压值，伏特（V）；

R_{M-PMU} 为标准电阻值，欧姆（ Ω ）。

f) 重复上述步骤，完成对其它管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流输出校准点的校准。

7.2.12 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压测量

管脚参数测量单元与高精度参数测量单元的电压测量参数校准方法相同，校准设备连接示意图如图 10 所示，校准步骤如下：

a) 将校准适配板安装到测试头上，校准适配板的数字通道接口与直流电压表连接；

b) 设置管脚参数测量单元/高精度参数测量单元的工作模式为加流测压（FIMV）模式，按照管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压测量参数的校准点（一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点），选取合适的标准电阻（标准电阻两端的电压不宜超过系统的施加电压量程，推荐范围为 100mV~1V），计算出相应的电流值作为管脚参数测量单元/高精度参数测量单元的施加电流 $I_{M-PMU-S}$ ，并输出到选取的数字通道接口上；

c) 用直流电压表测得标准电阻两端的电压值为 $U_{M-PMU-M}$ ；

d) 用系统管脚参数测量单元/高精度参数测量单元测得的电压值为 $U_{M-PMU-S}$ ；

e) 按照公式(11)计算管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压测量的误差，将测量结果记录在附录 A 表 A.12 中：

$$\Delta U_{M-PMU} = U_{M-PMU-S} - U_{M-PMU-M} \quad (11)$$

式中：

ΔU_{M-PMU} 为管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压测量的误差，伏特（V）；

$U_{M-PMU-S}$ 为管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压测量值，伏特（V）；

$U_{M-PMU-M}$ 为直流电压表测得的电压值，伏特（V）。

f) 重复上述步骤，完成对其它管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压测量校准点的校准。

6.2.13 器件供电电源电压输出

按图 11 连接校准所需设备。

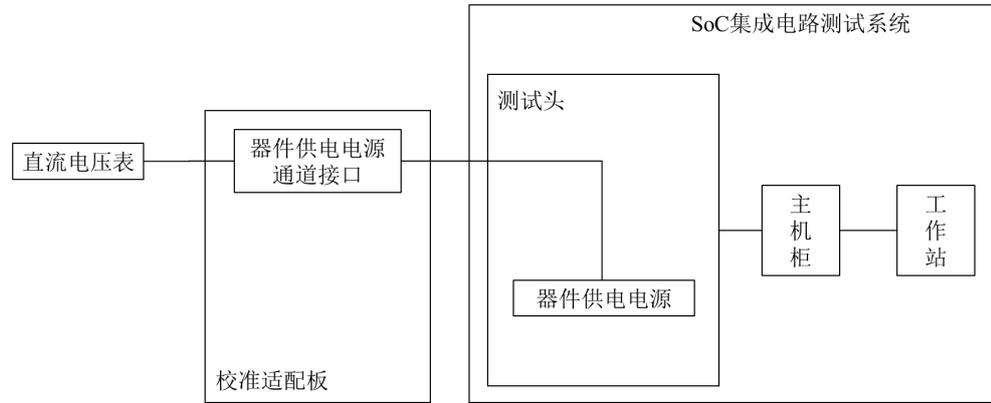


图 11 器件供电电源电压输出参数校准连线图

a) 将校准适配板安装到测试头上，校准适配板的器件供电电源通道接口与直流电压表连接；

b) 设置器件供电电源的工作模式为加压测流（FVMI）模式，按照器件供电电源电压输出参数的校准点设置器件供电电源的施加电压（一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）为 U_{DPS-S} ，将该信号输出到选取的器件供电电源通道接口上；

c) 用直流电压表测量器件供电电源通道接口的电压值为 U_{DPS-M} ；

d) 按照公式(12)计算器件供电电源电压输出的误差，将测量结果记录在附录 A 表 A.13 中：

$$\Delta U_{DPS} = U_{DPS-S} - U_{DPS-M} \quad (12)$$

式中：

ΔU_{DPS} 为器件供电电源电压输出的误差，伏特（V）；

U_{DPS-S} 为器件供电电源电压输出的设定值，伏特（V）；

U_{DPS-M} 为直流电压表测得的电压值，伏特（V）。

e) 重复上述步骤，完成对其它器件供电电源电压输出校准点的校准。

6.2.14 器件供电电源电流测量

按图 12 连接校准所需设备。

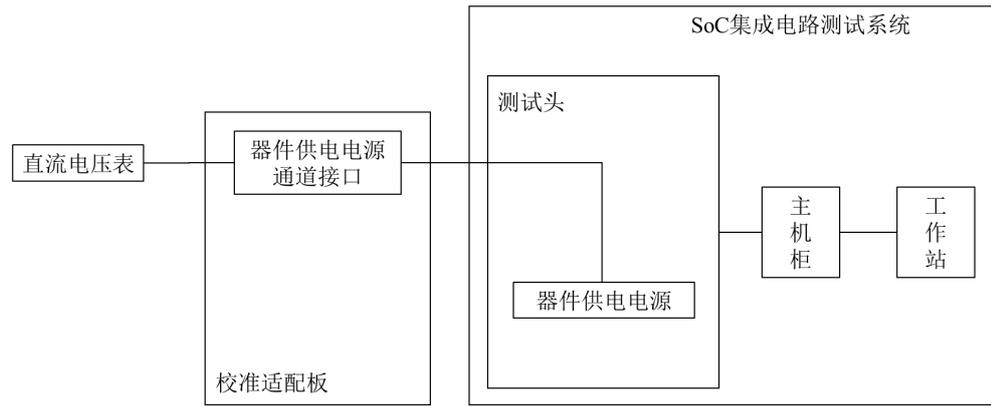


图 12 器件供电电源电流测量参数校准连线图

a) 将校准适配板安装到测试头上，校准适配板的器件供电电源通道接口与直流电压表、标准电阻连接，用直流电压表测量标准电阻两端的电压；

b) 设置器件供电电源为加压测流（FVMI）模式，选取合适的标准电阻 R_{DPS} （标准电阻两端的电压不宜超过系统的施加电压量程，推荐范围为 100mV~1V），按照电流测量的校准点（一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）计算出相应的电压值，作为系统器件供电电源的施加电压 U_{DPS} ，并输出到选取的器件供电电源通道接口上；

c) 用直流电压表测得标准电阻两端的电压值为 U_{DPS-M} ；

d) 系统测得器件供电电源的电流为 I_{DPS-S} ；

e) 按照公式(13)计算器件供电电源电流测量参数的误差，将测量结果记录在附录 A 表 A.14 中：

$$\Delta I_{DPS} = I_{DPS-S} - \frac{U_{DPS-M}}{R_{DPS}} \quad (13)$$

式中：

ΔI_{DPS} 为器件供电电源电流测量的误差，安培（A）；

I_{DPS-S} 为器件供电电源的电流测量值，安培（A）；

U_{DPS-M} 为直流电压表测得的电压值，伏特（V）；

R_{DPS} 为标准电阻值，欧姆（ Ω ）。

f) 重复上述步骤，完成对其它器件供电电源电流测量校准点的校准。

6.2.15 波形设置单元幅度输出

按图 13 连接校准所需设备。

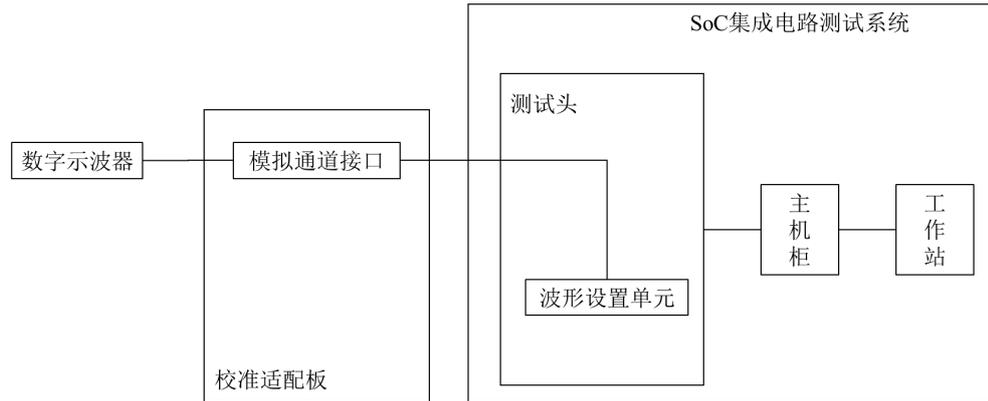


图 13 波形设置单元幅度输出参数校准连线图

a) 将校准适配板安装到测试头上，校准适配板的模拟通道接口与数字示波器的通道连接；

b) 将选取的模拟通道作为波形设置单元的信号输出通道，设置输出幅度为 $U_{\text{AWG-S}}$ （一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）、频率为 $f_{\text{AWG-S}}$ （一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）的正弦波信号，根据公式(14)计算系统所需设置的采样率 F_s （不超出系统的采样率范围，且要满足采样要求）；

$$F_s = \frac{N \times f_{\text{AWG}}}{M} \quad (14)$$

式中：

M 为输出波形的周期数；

N 为采样点数；

F_s 为系统所需设置的采样率，赫兹（Hz）。

c) 用数字示波器测量正弦波的幅度为 $U_{\text{AWG-M}}$ ；

d) 按照公式(15)计算波形设置单元幅度输出的误差，将结果记录在附录 A 表 A.15 中：

$$\Delta U_{\text{AWG}} = U_{\text{AWG-S}} - U_{\text{AWG-M}} \quad (15)$$

式中：

ΔU_{AWG} 为波形设置单元幅度输出的误差，伏特（V）；

$U_{\text{AWG-S}}$ 为系统波形设置单元设置的幅度值，伏特（V）；

$U_{\text{AWG-M}}$ 为数字示波器测得的幅度值，伏特（V）。

e) 重复上述步骤，完成对其它波形设置单元幅度输出校准点的校准。

6.2.16 波形设置单元频率输出

按图 14 连接校准所需设备。

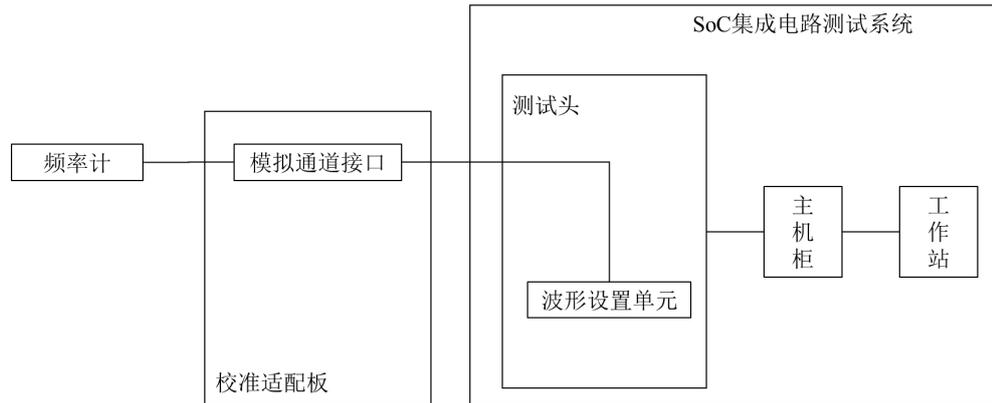


图 14 波形设置单元频率输出参数校准连线图

- a) 将校准适配板安装到测试头上，校准适配板的模拟通道接口与频率计连接；
- b) 将选取的模拟通道作为波形设置单元的信号输出通道，设置输出频率为 f_{AWG-S} （一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）、幅度为 U_{AWG-S} （一般为典型值，如 1V、0.5V）的正弦波信号，根据公式(14)计算系统所需设置的采样率 F_s （不超出系统的采样率范围，且要满足采样要求）；
- c) 用频率计测量正弦波的频率为 f_{AWG-M} ；
- d) 按照公式(16)计算波形设置单元频率输出的误差，将结果记录在附录 A 表 A.16 中；

$$\Delta f_{AWG} = f_{AWG-S} - f_{AWG-M} \quad (16)$$

式中：

Δf_{AWG} 为波形设置单元频率输出的误差，赫兹（Hz）；

f_{AWG-S} 为系统波形设置单元设置的频率值，赫兹（Hz）；

f_{AWG-M} 为频率计测得的频率值，赫兹（Hz）。

- e) 重复上述步骤，完成对其它波形设置单元频率输出校准点的校准。

6.2.17 波形数字化单元幅度测量

按图 15 连接校准所需设备。

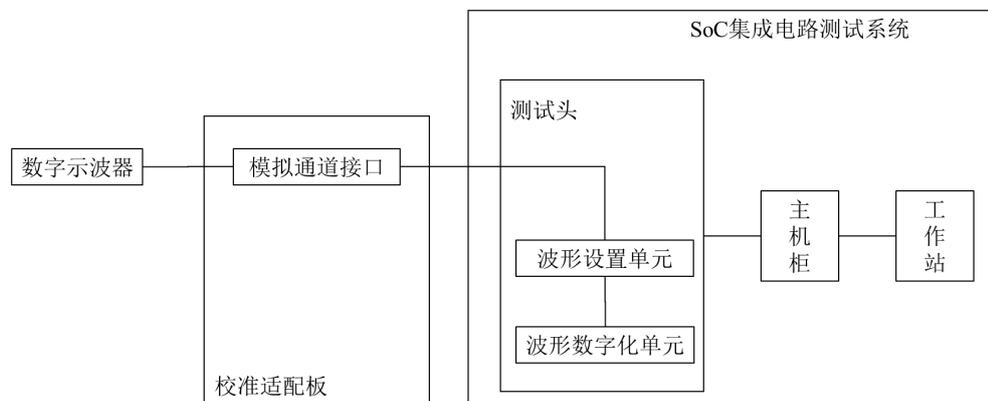


图 15 波形数字化单元幅度测量校准连线图

- a) 将校准适配板安装到测试头上，校准适配板的模拟通道接口与数字示波器的通道连接；
- b) 将选取的模拟通道作为波形设置单元的信号输出通道，由波形设置单元输出幅度为 $U_{\text{AWG-S}}$ （一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）、频率为 $f_{\text{AWG-S}}$ （一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）的正弦波；
- c) 根据公式(14)计算被校系统所需设置的采样率 F_s （不超出系统的采样率范围，且要满足采样要求），保证捕获至少一个完整周期的波形；
- d) 用被校系统的波形数字化单元测得正弦波信号的幅度为 $U_{\text{DGT-S}}$ ；
- e) 用数字示波器测得正弦波信号的幅度为 $U_{\text{DGT-M}}$ ；
- f) 按照公式(17)计算波形数字化单元幅度测量的误差，将结果记录在附录 A 表 A.17 中：

$$\Delta U_{\text{DGT}} = U_{\text{DGT-S}} - U_{\text{DGT-M}} \quad (17)$$

式中：

ΔU_{DGT} 为波形数字化单元幅度测量的误差，伏特（V）；

$U_{\text{DGT-S}}$ 为波形数字化单元测得的幅度值，伏特（V）；

$U_{\text{DGT-M}}$ 为数字示波器测得的幅度值，伏特（V）。

- g) 重复上述步骤，完成对其它波形数字化单元幅度测量校准点的校准。

6.2.18 波形数字化单元频率测量

按图 15 连接校准所需设备。

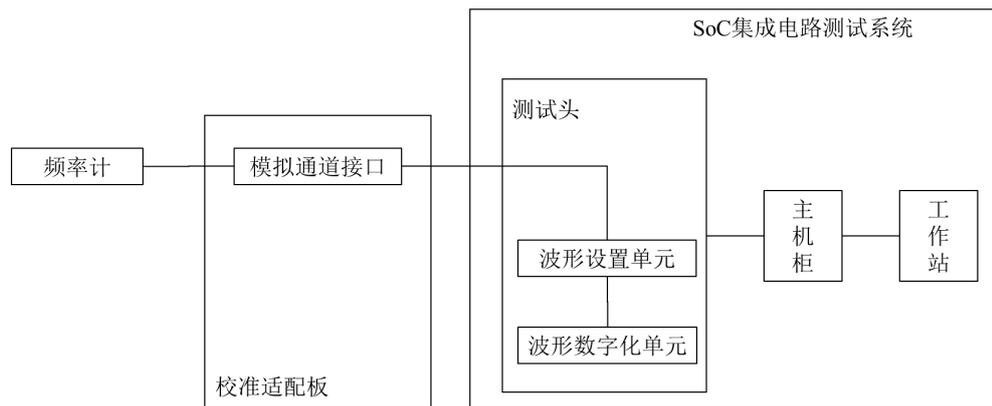


图 15 波形数字化单元频率测量校准连线图

- a) 将校准适配板安装到测试头上，校准适配板的模拟通道接口与频率计连接；
- b) 将选取的模拟通道作为波形设置单元的信号输出通道，由波形设置单元输出频率为 $f_{\text{AWG-S}}$ （一般为每量程的最低点、中间点、最高点，至少三个点）、幅度为 $U_{\text{AWG-S}}$ （一般为典型值，如 1V、0.5V）的正弦波；

- c) 根据公式(14)计算被校系统所需设置的采样率 F_s (不超出系统的采样率范围, 且要满足采样要求), 保证捕获至少一个完整周期的波形;
- d) 用被校系统的波形数字化单元测得正弦波信号的频率为 $f_{\text{DGT-S}}$;
- e) 用频率计测得正弦波信号的频率为 $f_{\text{DGT-M}}$;
- f) 按照公式(18)计算波形数字化单元频率测量的误差, 将结果记录在附录 A 表 A.18 中:

$$\Delta f_{\text{DGT}} = f_{\text{DGT-S}} - f_{\text{DGT-M}} \quad (18)$$

式中:

ΔU_{DGT} 为被校系统波形数字化单元频率测量的误差, 赫兹 (Hz);

$U_{\text{DGT-S}}$ 为被校系统波形数字化单元测得的频率值, 赫兹 (Hz);

$U_{\text{DGT-M}}$ 为频率计测得的频率值, 赫兹 (Hz)。

g) 重复上述步骤, 完成对其它波形数字化单元频率测量校准点的校准。

7 校准结果表达

SOC 集成电路测试系统校准后, 出具校准证书, 校准证书至少应包含以下信息:

- 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) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- 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

表 A.1 外观、附件和工作正常性检查

项目	检查结果
外观、附件	
工作正常性	

表 A.2 参考时钟频率

系统设定值 f_{R-S}/Hz	实测值 f_{R-M}/Hz	误差 $\Delta f_R/\text{Hz}$	测量不确定度($k=2$)

表 A.3 时间测量单元频率测量

系统测量值 f_{TMU-S}/Hz	标称值 f_{TMU-M}/Hz	误差 $\Delta f_{TMU}/\text{Hz}$	测量不确定度($k=2$)

表 A.4 测试速率

系统设定值 v_{DV-S}/bps	实测值 v_{DV-M}/bps	误差 $\Delta v_{DV}/\text{bps}$	测量不确定度($k=2$)

表 A.5 驱动器电压输出

系统设定值 U_{DU-S}/V	实测值 U_{DU-M}/V	误差 $\Delta U_{DU}/\text{V}$	测量不确定度($k=2$)

表 A.6 驱动器抖动输出

抖动输出频率 f_{DJ-S}/Hz	抖动设定值 J_{DJ-S}/s	实测值 J_{DJ-M}/s	误差 $\Delta J_{DJ}/\text{s}$	测量不确定度($k=2$)

表 A.7 驱动器上升/下降时间

项目	测量条件	实测值(s)	测量不确定度($k=2$)
上升时间 (t_r)	幅值: , 测试速率:		
下降时间 (t_f)			

表 A.8 比较器电压测量

项目	系统设定值 U_{OH-S}/V	实测值 U_{OH-M}/V	误差 $\Delta U_{OH}/\text{V}$	测量不确定度($k=2$)
比较器高电平				
项目	系统设定值 U_{OL-S}/V	实测值 U_{OL-M}/V	误差 $\Delta U_{OL}/\text{V}$	测量不确定度($k=2$)
比较器低电平				

表 A.9 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压输出

系统设定值 $U_{F-PMU-S}/\text{V}$	实测值 $U_{F-PMU-M}/\text{V}$	误差 $\Delta U_{F-PMU}/\text{V}$	测量不确定度($k=2$)

表 A.10 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流测量

系统测量值 $I_{F-PMU-S}/\text{A}$	电压实测值 $U_{F-PMU-M}/\text{V}$	标准电阻值 R_{F-PMU}/Ω	电流实测值 $I_{F-PMU-M}/\text{A}$	误差 $\Delta I_{F-PMU}/\text{A}$	测量不确定度 ($k=2$)

表 A.11 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流输出

系统设定值 $I_{M-PMU-S}/A$	电压实测值 $U_{M-PMU-M}/V$	标准电阻值 R_{M-PMU}/Ω	电流实测值 $I_{M-PMU-M}/A$	误差 $\Delta I_{M-PMU}/A$	测量不确定度 ($k=2$)

表 A.12 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压测量

系统测量值 $U_{M-PMU-S}/V$	实测值 $U_{M-PMU-M}/V$	误差 $\Delta U_{M-PMU}/V$	测量不确定度($k=2$)

表 A.13 器件供电电源电压输出

系统设定值 U_{DPS-S}/V	实测值 U_{DPS-M}/V	误差 $\Delta U_{DPS}/V$	测量不确定度($k=2$)

表 A.14 器件供电电源电流测量

系统测量值 I_{DPS-S}/A	电压实测值 U_{DPS-M}/V	标准电阻值 R_{DPS}/Ω	电流实测值 $I_{M-PMU-M}/A$	误差 $\Delta I_{DPS}/A$	测量不确定度($k=2$)

表 A.15 波形设置单元幅度输出

频率设定值 f_{AWG-S}/Hz	幅度设定值 U_{AWG-S}/V	幅度实测值 U_{AWG-M}/V	误差 $\Delta U_{AWG}/V$	测量不确定度 ($k=2$)

表 A.16 波形设置单元频率输出

幅度设定值 U_{AWG-S}/V	频率设定值 f_{AWG-S}/Hz	频率实测值 f_{AWG-M}/Hz	误差 $\Delta f_{AWG}/Hz$	测量不确定度 ($k=2$)

表 A.17 波形数字化单元幅度测量

频率设定值 f_{AWG-S}/Hz	系统幅度测量值 U_{DGT-S}/V	幅度实测值 U_{DGT-M}/V	误差 $\Delta U_{DGT}/V$	测量不确定度 ($k=2$)

表 A.18 波形数字化单元频率测量

幅度设定值 U_{AWG-S}/V	系统频率测量值 f_{DGT-S}/Hz	频率实测值 f_{DGT-M}/Hz	误差 $\Delta f_{DGT}/Hz$	测量不确定度 ($k=2$)

附录 B 校准证书内页格式

表 B.1 外观、附件和工作正常性检查

项目	检查结果
外观、附件	
工作正常性	

表 B.2 参考时钟频率

系统设定值 f_{R-S}/Hz	实测值 f_{R-M}/Hz	误差 $\Delta f_R/\text{Hz}$	测量不确定度($k=2$)

表 B.3 时间测量单元频率测量

系统测量值 $f_{\text{TMU-S}}/\text{Hz}$	标称值 $f_{\text{TMU-M}}/\text{Hz}$	误差 $\Delta f_{\text{TMU}}/\text{Hz}$	测量不确定度($k=2$)

表 B.4 测试速率

系统设定值 $v_{\text{DV-S}}/\text{bps}$	实测值 $v_{\text{DV-M}}/\text{bps}$	误差 $\Delta v_{\text{DV}}/\text{bps}$	测量不确定度($k=2$)

表 B.5 驱动器电压输出

系统设定值 $U_{\text{DU-S}}/\text{V}$	实测值 $U_{\text{DU-M}}/\text{V}$	误差 $\Delta U_{\text{DU}}/\text{V}$	测量不确定度($k=2$)

表 B.6 驱动器抖动输出

抖动输出频率 f_{DJ-S}/Hz	抖动设定值 J_{DJ-S}/s	实测值 J_{DJ-M}/s	误差 $\Delta J_{DJ}/\text{s}$	测量不确定度($k=2$)

表 B.7 驱动器上升/下降时间

项目	测量条件	实测值(s)	测量不确定度($k=2$)
上升时间 (t_r)	幅值: , 测试速率:		
下降时间 (t_f)			

表 B.8 比较器电压测量

项目	系统设定值 U_{OH-S}/V	实测值 U_{OH-M}/V	误差 $\Delta U_{OH}/\text{V}$	测量不确定度($k=2$)
比较器高电平				
项目	系统设定值 U_{OL-S}/V	实测值 U_{OL-M}/V	误差 $\Delta U_{OL}/\text{V}$	测量不确定度($k=2$)
比较器低电平				

表 B.9 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压输出

系统设定值 $U_{F-PMU-S}/\text{V}$	实测值 $U_{F-PMU-M}/\text{V}$	误差 $\Delta U_{F-PMU}/\text{V}$	测量不确定度($k=2$)

表 B.10 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流测量

系统测量值 $I_{F-PMU-S}/\text{A}$	电压实测值 $U_{F-PMU-M}/\text{V}$	标准电阻值 R_{F-PMU}/Ω	电流实测值 $I_{F-PMU-M}/\text{A}$	误差 $\Delta I_{F-PMU}/\text{A}$	测量不确定度 ($k=2$)

表 B.11 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电流输出

系统设定值 $I_{M-PMU-S}/A$	电压实测值 $U_{M-PMU-M}/V$	标准电阻值 R_{M-PMU}/Ω	电流实测值 $I_{M-PMU-M}/A$	误差 $\Delta I_{M-PMU}/A$	测量不确定度 ($k=2$)

表 B.12 管脚参数测量单元/高精度参数测量单元电压测量

系统测量值 $U_{M-PMU-S}/V$	实测值 $U_{M-PMU-M}/V$	误差 $\Delta U_{M-PMU}/V$	测量不确定度($k=2$)

表 B.13 器件供电电源电压输出

系统设定值 U_{DPS-S}/V	实测值 U_{DPS-M}/V	误差 $\Delta U_{DPS}/V$	测量不确定度($k=2$)

表 B.14 器件供电电源电流测量

系统测量值 I_{DPS-S}/A	电压实测值 U_{DPS-M}/V	标准电阻值 R_{DPS}/Ω	电流实测值 $I_{M-PMU-M}/A$	误差 $\Delta I_{DPS}/A$	测量不确定度($k=2$)

表 B.15 波形设置单元幅度输出

频率设定值 f_{AWG-S}/Hz	幅度设定值 U_{AWG-S}/V	幅度实测值 U_{AWG-M}/V	误差 $\Delta U_{AWG}/V$	测量不确定度 ($k=2$)

表 B.16 波形设置单元频率输出

幅度设定值 U_{AWG-S}/V	频率设定值 f_{AWG-S}/Hz	频率实测值 f_{AWG-M}/Hz	误差 $\Delta f_{AWG}/Hz$	测量不确定度 ($k=2$)

表 B.17 波形数字化单元幅度测量

频率设定值 f_{AWG-S}/Hz	系统幅度测量值 U_{DGT-S}/V	幅度实测值 U_{DGT-M}/V	误差 $\Delta U_{DGT}/V$	测量不确定度 ($k=2$)

表 B.18 波形数字化单元频率测量

幅度设定值 U_{AWG-S}/V	系统频率测量值 f_{DGT-S}/Hz	频率实测值 f_{DGT-M}/Hz	误差 $\Delta f_{DGT}/Hz$	测量不确定度 ($k=2$)

附录 C

主要项目不确定度评定示例

C.1 概述

主要项目的校准过程中所用到的设备情况如下：

(1) 直流电压表

直流电压范围： $\pm(10\text{mV}\sim 10\text{V})$ ，最大允许误差： $\pm 0.01\%$

输入阻抗范围： $\geq 1\text{G}\Omega$

(2) 频率计

频率范围： $1\text{kHz}\sim 5\text{GHz}$ ，最大允许误差： $\pm 2 \times 10^{-7}$

(3) 数字示波器

幅度测量范围： $\pm(100\text{mV}\sim 5\text{V})$ ，最大允许误差： $\pm 2\%$

上升/下降时间范围： $\geq 20\text{ps}$ ，最大允许误差： $\pm(5\%\sim 10\%)$

抖动测量范围： $100\text{ps}\sim 1\text{ns}$ ，最大允许误差： $\pm(1\text{ps}\sim 10\text{ps})$

(4) 标准电阻

电阻范围： $0.1\Omega\sim 10\text{M}\Omega$ ，准确度等级：0.01

额定功率范围： $\geq 1\text{W}$

C.2 电压参数的不确定度评定

C.2.1 测量方法

SOC 集成电路测试系统的电压参数校准采用直接测量法。SOC 集成电路测试系统的资源单元施加到校准适配板上，用直流电压表测得的电压即为电压测量参数值，其计算公式如下：

$$Y=V_0$$

式中：

Y 为被校系统的电压测量参数值；

V_0 为直流电压表的测得值。

C.2.2 不确定度来源及合成标准不确定度计算公式

C.2.2.1 不确定度来源

经分析，引入的不确定度分量来源包括：

- 1) 重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- 2) 直流电压表测量准确度引入的不确定度分量 u_2 ；

3) 直流电压表显示分辨力引入的不确定度分量 u_3 。

C.2.2.2 相对合成标准不确定度计算公式

以上不确定度分量互不相关，合成标准不确定度计算公式如下：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

C.2.3 不确定度计算

以直流电压 1V 为例进行计算。

C.2.3.1 重复性引入的不确定度分量

用直流电压表对直流信号进行连续 10 次独立测量，测得结果如下表：

测量次数	测量结果 (V)
1	1.00045
2	1.00048
3	1.00052
4	1.00056
5	1.00039
6	1.00048
7	1.00049
8	1.00053
9	1.00051
10	1.00049

根据下列贝塞尔公式计算实验标准偏差：

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

校准结果由 10 次重复测量的平均值得到，则由重复性引入的不确定度分量如下表：

校准点	\bar{x}	$S(x)$	不确定度分量 $u_1 = S(x)/\sqrt{10}$
1.0V	1.00049V	$4.7 \times 10^{-5} \text{V}$	$1.5 \times 10^{-5} \text{V}$

C.2.3.2 直流电压表测量准确度引入的不确定度分量

根据直流电压表的技术手册，设在校准点在 1V 量程下的测量准确度为 m ，半宽区间为 a ，考虑为均匀分布，选取 $k = \sqrt{3}$ ，得出直流电压表测量准确度引入的不确定度分量如下表：

校准点	量程	准确度 m	半宽区间 a	不确定度分量 $u_2 = a/k$

1.0V	1V	$\pm(\text{读数} \times 30\text{ppm} + \text{量程} \times 7\text{ppm}) = \pm 3.7 \times 10^{-5}\text{V}$	$3.7 \times 10^{-5}\text{V}$	$2.1 \times 10^{-5}\text{V}$
------	----	--	------------------------------	------------------------------

C.2.3.3 直流电压表分辨力引入的不确定度分量

根据直流电压表的技术手册，设直流电压表的分辨力为 δ ，其半宽区间为 a ，按均匀分布考虑，选取 $k = \sqrt{3}$ ，得出由分辨力引入的不确定度分量如下表：

校准点	量程	分辨力 δ	半宽区间 a	不确定度分量 $u_3 = a/k$
1.0V	1V	$1.0 \times 10^{-6}\text{V}$	$5.0 \times 10^{-7}\text{V}$	$2.9 \times 10^{-7}\text{V}$

C.2.4 合成标准不确定度

以上各项标准不确定度分量互不相关的，计算得出校准点的合成标准不确定度如下表：

校准点	不确定度分量 u_1	不确定度分量 u_2	不确定度分量 u_3	合成标准不确定度 u_c
1.0V	$1.5 \times 10^{-5}\text{V}$	$2.1 \times 10^{-5}\text{V}$	$2.9 \times 10^{-7}\text{V}$	$2.6 \times 10^{-5}\text{V}$

C.2.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度的计算公式为：

$$U = k \cdot u_c$$

得出校准点的合成标准不确定度如下表：

校准点	合成标准不确定度 u_c	扩展不确定度 $U_r (k=2)$
1.0V	$2.6 \times 10^{-5}\text{V}$	5.2×10^{-5}

C.3 电流参数的不确定度评定

C.3.1 测量方法

SOC 集成电路测试系统的电流参数校准采用间接测量法。将被校系统的资源通道与标准电阻器和直流电压表连接，用直流电压表测得被校系统的资源通道施加到外接标准电阻 R_0 上的电压 V_0 ，用下列公式计算出流经电阻器的电流 Y ，同时，被校系统也测得一个电流 I_0 。由于直流电压表的内阻值远大于标准电阻，所以数字表的分流作用可忽略不计。

$$Y = \frac{V_0}{R_0}$$

式中：

Y 为被校系统资源单元的电流参数值；

V_0 为直流电压表的测得电压值；

R_0 为标准电阻值。

根据上述数学方法，计算各分量对总体量值的不确定度贡献，得出各分量相对总体（测电流）的灵敏系数为 $\frac{\partial I}{\partial V} = \frac{1}{R}$ ， $\frac{\partial I}{\partial R} = \frac{-V}{R^2}$ 。

C.3.2 不确定度来源及合成标准不确定度计算公式

C.3.2.1 不确定度来源

经分析，引入的不确定度分量来源包括：

- 1) 直流电压表测量电压引入的不确定度分量 u_V ；
- 2) 电阻器引入的不确定度分量 u_R 。

C.3.2.2 相对合成标准不确定度计算公式

由于影响基准电压源的不确定度因素和影响电阻箱的不确定度因素二者之间没有关系，属独立不相关的情况，故不需考虑相关性问题的，其合成不确定度为：

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial V}\right)^2 \times u_V^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial R}\right)^2 \times u_R^2}$$

C.3.3 不确定度计算

以直流电流 200mA 为例进行计算。

C.3.3.1 直流电压表测量电压的不确定度分量

根据直流电压表的技术手册，设校准点在 10V 量程下的测量准确度为 m ，半宽区间为 a ，考虑为均匀分布，选取 $k = \sqrt{3}$ ，得出直流电压表测量准确度引入的不确定度分量如下表：

校准点	电压量程	标准电压	准确度 m	半宽区间 a	标准不确定度 u_V
200mA	10V	1.6621V	$\pm(\text{读数} \times 20\text{ppm} + \text{量程} \times 5\text{ppm}) = \pm 8.32 \times 10^{-5}\text{V}$	$8.32 \times 10^{-5}\text{V}$	$4.81 \times 10^{-5}\text{V}$

C.3.3.2 电阻器引入的不确定度分量

经过长期对精密电阻器测量，可认为电阻器的阻值很稳定，所以可不考虑 A 类分量的影响。设电阻器在不同量程下的允许误差限为 t ，设概率分布为均匀分布，选取 $k = \sqrt{3}$ ，则电阻器引入的不确定度分量如下表：

量程	最大允许误差 t	半宽区间 a	标准不确定度 u_R
10 Ω	$\pm 0.01\%$	0.01%	0.00058 Ω
100 Ω	$\pm 0.05\%$	0.05%	0.0288 Ω

10kΩ	±0.05%	0.05%	2.88Ω
100kΩ	±0.05%	0.05%	28.8Ω

C.3.4 合成标准不确定度

以上各项标准不确定度分量互不相关的，相对合成标准不确定度的计算公式为：

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial V}\right)^2 \times u_V^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial R}\right)^2 \times u_R^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 \times u_V^2 + \left(\frac{-V}{R^2}\right)^2 \times u_R^2}$$

得出校准点的合成标准不确定度如下表：

校准点	电压量程	标准电压	标准电阻 R	不确定度分量 u_V	不确定度分量 u_R	合成标准不确定度 u_c
200mA	10V	1.6621V	10.101Ω	$4.81 \times 10^{-5} \text{V}$	0.00058Ω	$1.1 \times 10^{-5} \text{A}$

C.3.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度的计算公式为：

$$U = k \cdot u_c$$

得出各校准点的合成标准不确定度如下表：

校准点	合成标准不确定度 u_c	扩展不确定度 U_r ($k=2$)
200mA	$1.1 \times 10^{-5} \text{A}$	1.1×10^{-4}

C.4 幅度参数的不确定度评定

C.4.1 测量方法

SOC 集成电路测试系统的幅度参数校准采用直接测量法。将被校系统的波形设置单元与数字示波器连接，其测得幅度值即为被校系统的幅度参数。其计算公式为：

$$Y=V_0$$

式中：

Y 为被校系统输出幅度的设定值；

V_0 为数字示波器的测得幅度值。

C.4.2 不确定度来源及合成标准不确定度计算公式

C.4.2.1 不确定度来源

经分析，引入的不确定度分量来源包括：

- 1) 数字示波器幅度测量重复性引入的不确定度分量 u_1 ；
- 2) 数字示波器交流信号幅度测量不准引入的不确定度分量 u_2 ；
- 3) 数字示波器显示分辨力引入的不确定度分量 u_3 ；

C.4.2.2 相对合成标准不确定度计算公式

根据上面分析结果，合成标准不确定度计算公式如下：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

C.4.3 不确定度计算

下面以频率 10MHz、幅度为 1V 的交流信号为例计算。

C.4.3.1 数字示波器幅度测量重复性引入的不确定度分量 u_A

数字示波器幅度测量不稳定引起的不确定度可以通过多次独立重复测量，并采用 A 类评定。利用数字示波器对信号进行连续 10 次独立测量，测得结果如下表：

测量次数	测量结果 (mV)
1	996.5
2	996.8
3	996.6
4	996.9
5	999.2
6	996.4
7	996.5
8	996.8
9	996.7
10	996.1
\bar{x}	996.9

计算得到实验标准偏差为：

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.86\text{mV}$$

因此，数字示波器幅度测量重复性引入的不确定度分量为： $u_1 = S(x)/\sqrt{10} = 0.3\text{mV}$ 。

C.4.3.2 数字示波器交流信号幅度测量不准引入的不确定度分量 u_2

数字示波器交流信号幅度测量不准引入的不确定度采用 B 类评定。根据数字示波器的说明书，测量交流电压幅度的准确度为 $\pm 2.0\%$ ，因此半宽区间 $a = 20\text{mV}$ 。视为均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，则数字示波器交流电压幅度测量不准引入的不确定度分量为： $u_2 = a/k = 11.5\text{mV}$ 。

C.4.3.3 数字示波器显示分辨力引入的不确定度分量 u_3

数字示波器显示分辨力引入的不确定度采用 B 类评定。根据数字示波器的说明书，其 A/D 转换器为 8 位；测量 1V 幅度时，数字示波器的垂直偏转系数为 500mV/div ，

满量程的分辨力为： $4\text{V}/2^8 = 15.6\text{mV}$ 。视为均匀分布，半宽区间 $a = 7.8\text{mV}$ ，取 $k = \sqrt{3}$ ，则数字示波器显示分辨力引入的不确定度分量为： $u_3 = a/k = 4.5\text{mV}$ 。

C.4.4 合成标准不确定度

不确定度分量汇总表如下表所示：

不确定度来源	数值	分布	类型
数字示波器幅度测量重复性引入的不确定度分量 u_1	0.3mV	/	A类
数字示波器交流信号幅度测量不准引入的不确定度分量 u_2	11.5mV	均匀	B类
数字示波器显示分辨力引入的不确定度分量 u_3	4.5mV	均匀	B类

以上各项标准不确定度分量互不相关的，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 12.4\text{mV}$$

C.4.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为： $U = k \times u_c = 24.8\text{mV}$ 。