

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX -XXXX

皮秒级快沿/脉冲发生器校准规范

Calibration Specification for Picosecond Fast Edge/Pulse Generators

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局

发布

皮秒级快沿/脉冲发生器校准规范

Calibration Specification for
Picosecond Fast Edge/Pulse Generators

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：中国计量科学研究院
北京无线电计量测试研究所
参加起草单位：中国信息通信研究院

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：

参加起草人：

目 录

引 言.....	II
1 范围.....	3
2 引用文件.....	3
3 概述.....	3
4 计量特性.....	3
4.1 脉冲幅度	3
4.2 脉冲上升/下降时间	3
4.3 脉冲宽度	3
4.4 脉冲周期	3
5 校准条件.....	4
5.1 环境条件	4
5.2 校准用设备（测量标准及其他设备）	4
6 校准项目和校准方法.....	4
6.1 校准项目	5
6.2 校准方法	5
7 校准结果表达.....	7
8 复校时间间隔.....	8
附录 A 原始记录内页格式.....	9
附录 B 校准证书内页格式.....	10
附录 C.....	11
附录 D 反卷积运算.....	17

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。

本规范为首次发布。

皮秒级快沿/脉冲发生器校准规范

1 范围

本校准规范适用于上升/下降时间达(3~25) ps 的皮秒级快沿/脉冲发生器的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 2076 高速光电探测器校准规范

IEC 60469: Edition 1.0 2013-04 过渡、脉冲和相关波形—术语、定义和算法 (Transitions, pulses and related waveforms – Terms, definitions and algorithms)

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡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

皮秒级快沿/脉冲发生器是指能产生上升/下降时间达(3~25) ps 脉冲波形的信号发生器，波形以类阶跃和类冲激脉冲为主。按信号产生机理可分为纯电类设备和光电类设备。在脉冲波形参数计量领域中，皮秒级快沿/脉冲发生器可作为标准器，用于宽带系统瞬态响应的校准溯源。随着宽带电子技术的发展，高速光通信、高速集成电路、高速采集系统等应用领域对脉冲上升/下降时间的要求越来越快，达到皮秒级的脉冲信号发生器被广泛应用。

4 计量特性

4.1 脉冲上升/下降时间

范围：3 ps~25 ps

不确定度：1.2 ps~4 ps ($k=2$)

4.2 脉冲宽度

脉冲宽度范围：7 ps~200 ns

不确定度：1.2 ps~10 ps ($k=2$)

4.3 脉冲幅度

范围：20 mV~5 V

最大允许误差： $\pm(2\%~8\%)$

4.4 脉冲周期

范围：100 Hz~100 MHz

最大允许误差： $\pm 1 \times 10^{-7}$

5 校准条件

5.1 环境条件

- 1) 环境温度： $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$;
- 2) 相对湿度： $\leq 80\%$;
- 3) 供电电源：电压 ($220\text{V} \pm 11\text{V}$)，频率 ($50\text{Hz} \pm 1\text{Hz}$);
- 4) 其它：周围无影响校准正常工作的机械振动和电磁干扰。

5.2 校准用设备（测量标准及其他设备）

5.2.1 取样示波器

带宽： $(20 \sim 100)$ GHz（注 1）

上升时间： $(3.5 \sim 17.5)$ ps，不确定度： 1.2 ps ($k=2$)

脉冲幅度： $(10 \sim 800)$ mV，不确定度： 1% ($k=2$)

5.2.2 频率计

频率范围： 10 Hz~ 100 MHz

频率偏差： $\pm 1 \times 10^{-8}$

5.2.3 同轴衰减器

频率范围： $\text{DC} \sim 100$ GHz（注 1）

衰减值： $(10 \sim 20)$ dB，不确定度： $(0.02 \sim 0.10)$ dB ($k=2$)

5.2.4 飞秒脉冲激光器

波长范围： $400\text{nm} \sim 2400\text{nm}$

脉冲重复频率范围及最大允许误差： $10\text{MHz} \sim 200\text{MHz}$ ， $\pm 2\%$

脉冲宽度及最大允许误差： $\leq 300\text{fs}$ ， $\pm 5\%$

激光平均功率： $3\text{mW} \sim 100\text{mW}$

功率稳定度：优于 $\pm 1\%$ （30 分钟）

5.2.5 电光采样模块

波长范围： $400\text{nm} \sim 2400\text{nm}$

带宽范围： $50\text{GHz} \sim 110\text{GHz}$ （注 1）

上升时间： $3\text{ps} \sim 7\text{ps}$ ，不确定度： 1.2ps ($k=2$)

注 1：此处频率值可根据能够覆盖被校对象的带宽上限来确定。

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目见表 1 所示。

表 1 皮秒级快沿/脉冲发生器校准项目

序号	校准项目名称	条款
1	脉冲上升/下降时间	6.2.2
2	脉冲宽度	6.2.3
3	脉冲幅度	6.2.4
4	脉冲重复频率	6.2.5

6.2 校准方法

6.2.1 外观及工作正常性检查

a) 被校皮秒级快沿/脉冲发生器的各开关、按键等调节正常，应无影响仪器正常工作的机械损伤；各种必要的附件和文件应齐全。检查结果记录于附录 A 表 A.1 中。

b) 对被校皮秒级快沿/脉冲发生器进行加电或光检查；有自检功能的，应能通过自检。检查结果记录于附录 A 表 A.1 中。

6.2.2 脉冲上升/下降时间

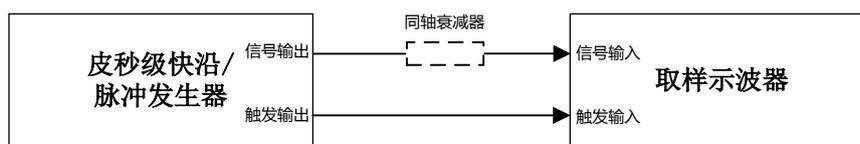


图 1 纯电类皮秒级快沿/脉冲发生器脉冲上升/下降时间校准连接图

6.2.2.1 纯电类皮秒级快沿/脉冲发生器

a) 如图 1 所示连接仪器，皮秒级快沿/脉冲发生器信号输出端口连接取样示波器信号输入端口，皮秒级快沿/脉冲发生器触发输出端口连接取样示波器触发输入端口。若皮秒级快沿/脉冲发生器输出脉冲幅度超过取样示波器垂直量程，需连接同轴衰减器，将被测信号的脉冲幅度衰减至 $\leq 80\%$ 取样示波器最大垂直量程。

b) 调节取样示波器触发方式、触发电平、垂直灵敏度、水平灵敏度以及延时等设置，使波形稳定显示，脉冲波形显示幅度应占屏幕垂直量程的 80% 左右，脉冲上升沿或下降沿应占时窗(5~15%)左右。

c) 打开取样示波器时间相关测量功能，测量脉冲上升/下降时间，并记录于附录 A 的表 A.2 中。

d) 如果被校皮秒级快沿/脉冲发生器脉冲上升/下降时间与取样示波器上升时间之比大于 1/2，且取样示波器系统响应函数已知，可用反卷积法计算被校脉冲波形。设置取样示波器水平灵敏度，使时窗内完整显示波形信息，采样点数 ≥ 4000 ，打开波形平均功能（建议平均次数 ≥ 16 ），计算机读取平均后的脉冲波形数据。按附录 D 反卷积运算方法计算皮

秒级快沿/脉冲发生器的输出波形。按附录 E 计算波形的上升/下降时间，并记录于附录 A 的表 A.2 中。

6.2.2.2 光电类皮秒级快沿/脉冲发生器

参照 JJF2076—2023 高速光电探测器校准规范中 6.2.2 所述校准方法测量。将脉冲上升/下降时间记录于附录 A 的表 A.2 中。

6.2.3 脉冲宽度

6.2.3.1 纯电类皮秒级快沿/脉冲发生器

a) 纯电类皮秒级快沿/脉冲发生器如图 1 所示连接仪器，皮秒级快沿/脉冲发生器信号输出端口连接取样示波器信号输入端口，皮秒级快沿/脉冲发生器触发输出端口连接取样示波器触发输入端口。若皮秒级快沿/脉冲发生器输出脉冲幅度超过取样示波器垂直量程，需连接同轴衰减器，将被测信号的脉冲幅度衰减至 $\leq 80\%$ 取样示波器最大垂直量程。

b) 调节取样示波器触发方式、触发电平、垂直灵敏度、水平灵敏度以及延时等设置，使波形稳定显示，脉冲波形显示幅度应占屏幕垂直量程的 80% 左右，脉冲波形宽度应占时窗(60~80)%左右。

c) 打开取样示波器时间相关测量功能，测量脉冲宽度，并记录于附录 A 的表 A.3 中。

6.2.3.2 光电类皮秒级快沿/脉冲发生器

参照 JJF2076—2023 高速光电探测器校准规范中 6.2.2 所述校准方法测量。将脉冲上升/下降时间记录于附录 A 的表 A.3 中。

6.2.4 脉冲幅度

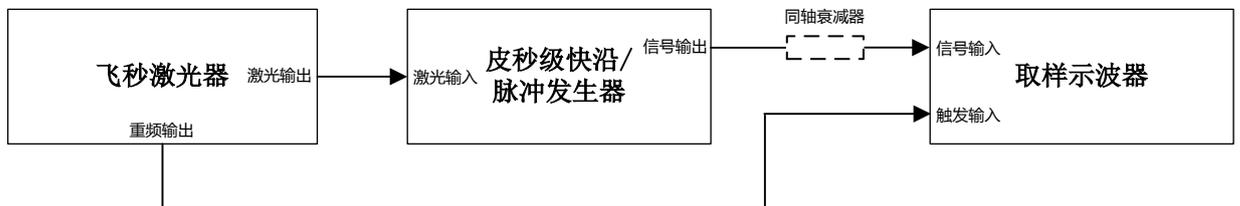


图 2 光电类皮秒级快沿/脉冲发生器脉冲幅度校准连接图

a) 纯电类皮秒级快沿/脉冲发生器如图 1 所示连接仪器，皮秒级快沿/脉冲发生器信号输出端口连接取样示波器信号输入端口，皮秒级快沿/脉冲发生器触发输出端口连接取样示波器触发输入端口；光电类皮秒级快沿/脉冲发生器如图 2 所示连接仪器，飞秒激光器输出飞秒激光至皮秒级快沿/脉冲发生器激光输入端口，直流电源输出直流电压至皮秒级快沿/脉冲发生器直流输入端口，皮秒级快沿/脉冲发生器信号输出端口连接取样示波器信号输入端口，飞秒激光器重频输出端口连接取样示波器触发输入端口。若皮秒级快沿/脉冲发生器输出脉冲幅度超过取样示波器垂直量程，需连接同轴衰减器，将被测信号的脉冲幅度衰减至 $\leq 80\%$ 取样示波器最大垂直量程。

b) 调节取样示波器触发方式、触发电平、垂直灵敏度、水平灵敏度以及延时等设置，

使波形稳定显示且脉冲波形居于屏幕中间位置，脉冲波形显示幅度应占屏幕垂直量程的 80% 左右，脉冲波形宽度应占时窗(10~50)%左右。

c) 打开取样示波器幅度相关测量功能，测量脉冲幅度并记录于附录 A 的表 A.4 中。对于类阶跃脉冲波形，脉冲幅度为顶量值与底量值之差的绝对值；对于类冲激脉冲波形，脉冲幅度为正峰值与底量值之差，或顶量值与负峰值之差。

d) 对于纯电类皮秒级快沿/脉冲发生器，若有幅度设置功能，设置其他脉冲幅度值，重复操作步骤 b) ~c)，测量不同脉冲幅度并记录于附录 A 的表 A.4 中；对于光电类皮秒级快沿/脉冲发生器，设置不同的激光输出功率，重复操作步骤 b) ~c)，测量不同脉冲幅度并记录于附录 A 的表 A.4 中。

6.2.5 脉冲重复频率



图 3 纯电类皮秒级快沿/脉冲发生器脉冲重复频率校准连接图

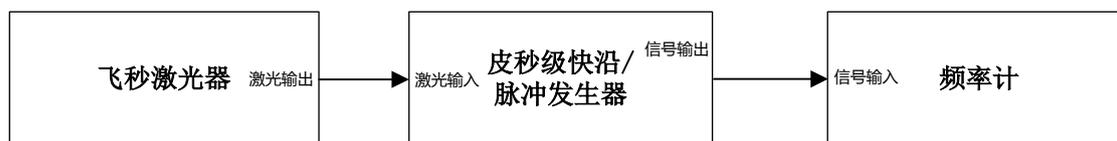


图 4 光电类皮秒级快沿/脉冲发生器脉冲重复频率校准连接图

a) 纯电类皮秒级快沿/脉冲发生器如图 3 所示连接仪器，皮秒级快沿/脉冲发生器信号输出端口连接频率计信号输入端口；光电类皮秒级快沿/脉冲发生器如图 4 所示连接仪器，飞秒激光器输出飞秒激光至皮秒级快沿/脉冲发生器激光输入端口，直流电源输出直流电压至皮秒级快沿/脉冲发生器直流输入端口，皮秒级快沿/脉冲发生器信号输出端口连接频率计信号输入端口。

b) 设置频率计频率测量功能，测量脉冲重复频率，并记录于附录 A 的表 A.5 中。

c) 如果皮秒级快沿/脉冲发生器具有重频设置功能，改变脉冲输出重复频率，用频率计测量并记录于附录 A 的表 A.5 中。

7 校准结果表达

校准证书或校准报告应至少包含以下信息：

- 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) 被校对象地描述和明确标识;
- 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和应用有关时, 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) 对校准规范偏离的说明;
- n) 校准证书及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

皮秒级快沿/脉冲发生器的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 外观及工作正常性检查

检查项目	检查结果
外观	
工作正常性	

表 A.2 脉冲上升/下降时间

测量值	$U(k=2)$

表 A.3 脉冲宽度

测量值	$U(k=2)$

表 A.4 脉冲幅度

输出幅度设置	测量值	$U(k=2)$
.....		
.....		

表 A.5 脉冲重复频率

重复频率设置	测量值	$U(k=2)$
.....		
.....		

附录 B 校准证书内页格式

表 B.1 脉冲上升/下降时间

测量值	$U(k=2)$

表 B.2 脉冲宽度

测量值	$U(k=2)$

表 B.3 脉冲幅度

输出幅度设置	测量值	$U(k=2)$
.....		
.....		

表 B.4 脉冲重复频率

重复频率设置	测量值	$U(k=2)$
.....		
.....		

附录 C

主要项目不确定度评定示例

C.1 脉冲上升时间

C.1.1 测量方法

按 6.2.2 上升时间校准方法连接仪器并实现校准测量，可知不确定度分量主要来源于被测脉冲发生器和取样示波器相关测量指标。

C.1.2 测量模型

按 6.2.2 校准方法可知，脉冲发生器测量上升时间的测量模型如式 (C.1) 所示。

$$t_r = t_m \quad (\text{C.1})$$

式中：

t_r ——脉冲发生器上升时间，s；

t_m ——取样示波器测量的上升时间，s。

C.1.3 不确定度来源

- a) 取样示波器带宽影响引入的不确定度 u_1 ；
- b) 取样示波器幅度测量误差引入的不确定度 u_2 ；
- c) 取样示波器时基抖动引入的不确定度 u_3 ；
- d) 测量重复性引入的不确定度 u_4 ；

C.1.4 标准不确定度评定

- a) 取样示波器带宽影响引入的不确定度

以取样示波器 Agilent 86118A 测量快沿脉冲信号发生器 Keysight N2806A 为例，两台设备可作为两个高斯系统级联，则测量波形的上升时间与两台设备各自的上升时间存在方和根关系，进而可推导出测量结果 t_m 相对于被测真值产生的相对误差可由式 (C.2) 表示。

$$\Delta t_m = \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} - 1 \quad (\text{C.2})$$

式中：

Δt_m ——上升时间测量值的相对误差，s；

n ——快沿脉冲信号发生器输出脉冲信号的上升时间与取样示波器上升时间的比值。

已知取样示波器 86118A 的上升时间为 5ps，快沿脉冲信号发生器 N2806A 的上升时间指标为 10ps，则比值 $n=2$ 。根据公式 (C.2) 计算测量上升时间相对误差为 11.8%。取样示波器实测脉冲波形的上升时间为 9.8ps，则取样示波器带宽影响引入的误差为 1.2ps。按均匀分布，取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，则标准不确定度 $u_1=1.2/\sqrt{3}=0.69\text{ps}$ 。

- b) 取样示波器幅度测量误差引入的不确定度

以取样示波器 Agilent 86118A 测量快沿发生器 Keysight N2806A 为例。根据取样示波器 86118A 说明书给出的技术指标,在 70 GHz 带宽档位下,直流测量最大允许误差为 $\pm 0.4\%$ of full scale ± 2 mV $\pm 4\%$ of channel offset。以 N2806A 的 500 mV 脉冲幅度测量为例,通道偏置为 0V、全量程为 800mV,脉冲波形顶量值或底量值测量误差为 $800 \times 0.4\% + 2 = 5.2$ mV,脉冲幅度为顶量值与底量值之差,则合成误差为 $\sqrt{2} \times 5.2 = 7.4$ mV。

按取样示波器实际测量结果计算波形上升沿斜率 k_p , 脉冲幅度测量平均值为 512mV, 脉冲上升时间测量平均值为 9.8ps。由于上升时间为 10%~90%的幅度值, 因此计算波形上升沿斜率 $k_p=512 \times 0.8/9.8=41.8$ mV/ps。则 7.4 mV 脉冲幅度误差将引入上升时间误差为 $7.4\text{mV}/k_p=0.18$ ps。按均匀分布, 取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, 则标准不确定度 $u_2=0.18/\sqrt{3}=0.11$ ps。

c) 取样示波器时基抖动引入的不确定度

取样示波器主机 N1000A 实测时基抖动为 800fs, 则取样示波器时基抖动对上升时间测量引入误差为 $800\text{fs}/2=400\text{fs}$ 。按均匀分布, 取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, 则标准不确定度 $u_3=0.4/\sqrt{3}=0.23$ ps。

d) 测量重复性引入的不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。取样示波器测量脉冲信号上升时间 10 次, 测量结果如表 C.1 所示。10 次测量的上升时间平均值为 9.8ps, 按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.25ps, 则测量重复性引入的不确定度为 $u_4=0.25$ ps。

表 C.1 上升时间测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值(ps)	9.72	9.30	9.87	9.98	9.57	9.91	10.18	9.82	9.51	9.70

C.1.5 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 C.2。

表 C.2 上升时间测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2, 3, 4$	标准不确定度分量
				符号	数值		
取样示波器带宽影响	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_1	0.69ps	1	0.69ps
取样示波器幅度测量误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_2	0.11ps	1	0.11ps
取样示波器时	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_3	0.23ps	1	0.23ps

基抖动							
测量重复性	A	—	—	u_4	0.25ps	1	0.25ps

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{(c_1 u_1)^2 + (c_2 u_2)^2 + (c_3 u_3)^2 + (c_4 u_4)^2} = 0.78 \text{ps}$$

C.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=1.6 \text{ps}$ 。

C.2 脉冲幅度

C.2.1 测量方法

如 6.2.4 脉冲幅度校准方法所描述测量步骤，以纯电皮秒级快沿/脉冲发生器为例实现脉冲幅度测量。将被校皮秒级快沿/脉冲发生器输出端连接取样示波器，设置取样示波器幅度测量功能并测量。

C.2.2 测量模型

根据测量方法可知测量模型为：

$$A = A_m \quad (\text{C.3})$$

式中：

A ——脉冲幅度值，V；

A_m ——取样示波器测量的脉冲幅度值，V。

C.2.3 不确定度来源

根据测量方法可知，不确定度来源包括：

- a) 取样示波器幅度测量引入的不确定度 u_1 ；
- b) 测量重复性引入的不确定度 u_2 。

C.2.4 标准不确定度评定

- a) 取样示波器幅度测量引入的不确定度

以取样示波器 Agilent 86118A 测量快沿发生器 Keysight N2806A 为例。根据取样示波器 86118A 说明书给出的技术指标，在 70 GHz 带宽档位下，直流测量最大允许误差为 $\pm 0.4\%$ of full scale $\pm 2 \text{mV} \pm 4\%$ of channel offset。以 N2806A 的 500 mV 脉冲幅度测量为例，通道偏置为 0V、全量程为 800mV，脉冲波形顶量值或底量值测量误差为 $800 \times 0.4\% + 2 = 5.2 \text{mV}$ ，脉冲幅度为顶量值与底量值之差，则合成误差为 $\sqrt{2} \times 5.2 = 7.4 \text{mV}$ ，按均匀分布，取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，则标准不确定度 $u_1 = 7.4/\sqrt{3} = 4.3 \text{mV}$ 。

b) 测量重复性引入的不确定度

表 C.3 脉冲幅度 10 次测量值

次数	测量值 (mV)	次数	测量值 (mV)
1	511.8	6	512.3
2	514.6	7	514.6
3	513.4	8	511.9
4	511.5	9	508.8
5	509.4	10	512.7

表 C.3 是取样示波器测量被测快沿发生器输出脉冲幅度的 10 次测量结果, 计算测量结果平均值为

$$\bar{A}_m = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} A_{mi} = 512.1 \text{ mV}$$

平均值的标准偏差为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (A_{mi} - \bar{A}_m)^2}{n(n-1)}} \approx 0.6 \text{ mV}$$

则由测量重复性引入的标准不确定度 u_2 为 0.6 mV。

C.2.5 合成标准不确定度

各标准不确定度分量一览表如表 C.4 所示。

表 C.4 脉冲幅度测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2$	标准不确定度分量
				符号	数值		
取样示波器幅度测量	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_1	15.01mV	1	4.3mV
测量重复性	A	—	—	u_2	0.6mV	1	0.6mV

以上各不确定度分量独立不相关, 则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{(c_1 u_1)^2 + (c_2 u_2)^2} \approx 4.4 \text{ mV}$$

C.2.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=8.8 \text{ mV}$ 。

C.3 脉冲重复频率

C.3.1 测量方法

如 6.2.5 脉冲重复频率校准方法所述测量步骤, 以纯电皮秒级快沿/脉冲发生器为例实

现脉冲重复频率测量。将被校皮秒级快沿/脉冲发生器输出端连接频率计，设置频率计频率测量功能并测量。

C.3.2 测量模型

按 6.2.5 校准方法可知，脉冲重复频率的测量模型如式 (C.4) 所示。

$$f = f_m \quad (\text{C.4})$$

式中：

f ——脉冲重复频率，Hz；

f_m ——频率计测量的脉冲重复频率，Hz。

C.3.3 不确定度来源

a) 频率计晶振频率偏差引入的相对不确定度 u_1 ；

b) 频率计读数分辨力引入的相对不确定度 u_2 ；

c) 测量重复性引入的相对不确定度 u_3 ；

C.3.4 相对标准不确定度评定

a) 频率计晶振频率偏差引入的相对不确定度

按频率计说明书给出的技术指标，其晶振频率偏差最大允许误差为 $\pm 5 \times 10^{-9}$ ，设为均匀分布，取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，则相对标准不确定度 $u_1 = 5 \times 10^{-9} / \sqrt{3} = 2.9 \times 10^{-9}$

b) 频率计读数分辨力引入的相对不确定度

皮秒级快沿/脉冲发生器输出脉冲重复频率为 4 MHz，频率计测量读数分辨力为 0.000001MHz，设为均匀分布，取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，则相对标准不确定度 u_2 为

$$u_2 = \frac{0.000001}{4 \times 2 \times \sqrt{3}} \approx 7.2 \times 10^{-8}$$

c) 测量重复性引入的相对不确定度

表 C.5 重复频率 10 次测量值

次数	测量值 (MHz)	次数	测量值 (MHz)
1	3.999876	6	3.999848
2	3.999859	7	3.999864
3	3.999862	8	3.999851
4	3.999845	9	3.999837
5	3.999873	10	3.999868

表 C.5 是频率计测量的 10 次重复频率值，计算测量结果平均值为

$$\bar{f}_m = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} f_{mi} = 3.999858 \text{ MHz}$$

平均值的标准偏差为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (f_{mi} - \bar{f}_m)^2}{n(n-1)}} \approx 4.03 \times 10^{-6} \text{ MHz}$$

则由测量重复性引入的相对标准不确定度分量 u_3 为

$$u_3 = \frac{s}{\bar{f}_m} \approx 1.0 \times 10^{-6}$$

C.3.5 合成相对标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 C.6。

表 C.6 脉冲重复频率测量的相对标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2, 3$	相对标准不 确定度分量
				符号	数值		
频率计晶振频率偏差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_1	2.9×10^{-9}	1	2.9×10^{-9}
频率计读数分辨率	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_2	7.2×10^{-8}	1	7.2×10^{-8}
测量重复性	A	—	—	u_3	1.0×10^{-6}	1	1.0×10^{-6}

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_{crel} = \sqrt{(c_1 u_1)^2 + (c_2 u_2)^2 + (c_3 u_3)^2} = 1.0 \times 10^{-6}$$

C.3.6 相对扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U_{rel}=k \cdot u_{crel}=2.0 \times 10^{-6}$ 。

附录 D 反卷积运算

用取样示波器测量脉冲波形，若已知取样示波器的系统传递函数，可用反卷积算法对取样示波器测量数据进行数字信号处理，计算得到被测脉冲波形数据。反卷积算法公式如式 (D.1) 所示。

$$f_p(t) = f_m(t) \frac{1}{*} f_o(t) \quad (\text{D.1})$$

式中：

- t ——具有相等时间间隔的时序数据，s；
- $f_p(t)$ ——被测脉冲波形数据，V；
- $f_m(t)$ ——取样示波器测量的波形数据，V；
- $f_o(t)$ ——取样示波器系统传递函数，V；
- $\frac{1}{*}$ ——反卷积运算符号。

此反卷积运算可由计算机编程实现，实现步骤如下：

a) 波形数据中应包含时序数据和幅值数据，计算取样示波器系统传递函数中时序数据的时间间隔 Δt_s ，计算取样示波器测量的脉冲波形数据中时序数据的时间间隔 Δt_m 。以 Δt_s 为时间间隔调整幅值数据 $f_m(t)$ ，调整方法如下：

方法一：以 Δt_s 设置取样示波器采样间隔，重新测量波形获取幅值数据 $f_m(t)$ 。

方法二：以 Δt_s 为时间间隔对取样示波器测量波形数据中的幅值数据 $f_m(t)$ 做插值运算，计算公式 (D.2) 所示。

$$f_m(t_x) = \frac{f_m(t_2) - f_m(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t_x + \frac{f_m(t_1)t_2 - f_m(t_2)t_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{D.2})$$

式中：

- t_1 ——具有相等时间间隔的时序数据中的时刻值，s；
- t_2 ——具有相等时间间隔的时序数据中的时刻值，位置与 t_1 相邻，且值大于 t_1 ，s；
- t_x ——位置与 t_1 相邻，且值大于 t_1 小于 t_2 的时刻值，s；
- Δt_s ——时序数据的时间间隔，s；
- $f_m(t_1)$ —— t_1 时刻取样示波器测量的波形幅值数据，V；
- $f_m(t_2)$ —— t_2 时刻取样示波器测量的波形幅值数据，V；
- $f_m(t_x)$ —— t_x 时刻取样示波器测量的波形幅值数据，V。

b) 计算取样示波器系统传递函数中时序数据的时间窗长度 T_s ，计算取样示波器测量的脉冲波形数据中时序数据的时间窗长度 T_m 。以 T_s 为时间窗长度调整取样示波器测量波形数据中幅值数据 $f_m(t)$ ，调整方法如下：

当 $T_s < T_m$ 时，按 T_s 时长截取幅值数据 $f_m(t)$ （应包含主峰波形和反射波形）；

当 $T_s > T_m$ 时，对幅值数据 $f_m(t)$ 做补零处理或补噪声处理。

c) 将以上数据处理后的 $f_o(t)$ 和 $f_m(t)$ 的波形数据做快速傅里叶变换 (FFT) 运算, 得到 $f_o(t)$ 的幅频响应 $A_o(\omega)$ 和相频响应 $\varphi_o(\omega)$ 、 $f_m(t)$ 的幅频响应 $A_m(\omega)$ 和相频响应 $\varphi_m(\omega)$ 。

d) 对幅频响应做除法运算, 即 $A_m(\omega)/A_o(\omega)$, 得到被测脉冲波形幅频响应 $A_p(\omega)$; 对相频响应做除法运算, 即 $\varphi_m(\omega)/\varphi_o(\omega)$, 得到被测脉冲波形相频响应 $\varphi_p(\omega)$ 。

e) 整合被测脉冲波形幅频响应 $A_p(\omega)$ 和相频响应 $\varphi_p(\omega)$, 做快速反傅里叶变换 (IFFT) 运算, 得到被测脉冲波形 $f_p(t)$ 。

附录 E 波形上升/下降时间计算

波形上升/下降时间的计算依照 IEC 60469: Edition 1.0 2013-04 中第 5 章波形分析算法的内容来实现。由于 IEC 标准文件中相关计算内容过多,在此仅摘录计算上升/下降时间(过渡持续时间)主要步骤以供参考。

a) 确定状态电平

基于数据分布的方法分析波形数据,确定波形的状态电平。IEC 标准中推荐方法包括:直方图法、shorth 估计量法、峰值幅度法等。根据波形类型选择合适的方法,确定波形的 s_1 状态电平和 s_2 状态电平。

b) 计算波形幅度

波形幅度 A 是 s_1 状态电平和 s_2 状态电平之间的差值。

对于正向过渡, A 由式 (E.1) 计算:

$$A = level(s_2) - level(s_1) \quad (E.1)$$

式中:

A ——波形幅度;

$level(s_1)$ —— s_1 状态电平;

$level(s_2)$ —— s_2 状态电平。

对于负向过渡, A 由式 (E.2) 计算:

$$A = level(s_1) - level(s_2) \quad (E.2)$$

c) 计算百分数参考电平

使用式 (E.3) 计算百分数参考电平 $y_{x\%}$ 。

$$y_{x\%} = level(s_1) + \frac{|A|}{100} x\% \quad (E.3)$$

式中:

$y_{x\%}$ ——百分数参考电平的值;

x ——指定参考电平的百分数;

$level(s_1)$ —— s_1 状态电平。

通常上升/下降时间为 10% 参考电平时刻和 90% 参考电平时刻之间的时间间隔。因此,需按式 (E.3) 先分别计算 10% 参考电平值 $y_{10\%}$ 和 90% 参考电平值 $y_{90\%}$ 。

d) 计算参考电平时刻

使用线性插值计算 $x\%$ 参考电平时刻,如式 (E.4) 所示。

$$t_{x\%} = t_{x\%-} + \frac{(t_{x\%+} - t_{x\%-})}{(y_{x\%+} - y_{x\%-})} (y_{x\%} - y_{x\%-}) \quad (E.4)$$

式中:

$y_{x\%}$ —— $x\%$ 参考电平;

$t_{x\%}$ —— $x\%$ 参考电平时刻；

$y_{x\%-}$ 和 $y_{x\%+}$ ——最接近数值 $y_{x\%}$ 的两个相邻采样点，满足 $y_{x\%-} \leq y_{x\%} \leq y_{x\%+}$ ；

$t_{x\%-}$ 和 $t_{x\%+}$ —— $y_{x\%-}$ 和 $y_{x\%+}$ 对应的时刻。

按式（E.4）分别计算10%参考电平 $y_{10\%}$ 对应时刻 $t_{10\%}$ ，90%参考电平 $y_{90\%}$ 对应时刻 $t_{90\%}$ 。

e) 计算上升/下降时间

使用式（E.5）计算10%-90%上升/下降时间。

$$t_{10\%-90\%} = |t_{10\%} - t_{90\%}| \quad (\text{E.5})$$

式中：

$t_{10\%-90\%}$ ——10%参考电平和90%参考电平之间的上升/下降时间；

$t_{10\%}$ 是10%参考电平的参考电平时刻；

$t_{90\%}$ 是90%参考电平的参考电平时刻。