



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2090—2023

石英晶体频率标准校准规范

Calibration Specification for Quartz Crystal Frequency Standards



2023-10-12 发布

2024-04-12 实施

国家市场监督管理总局 发布

石英晶体频率标准校准规范
Calibration Specification for Quartz Crystal
Frequency Standards

JJF 2090—2023
代替 JJG 181—2005

归口单位：全国时间频率计量技术委员会
主要起草单位：中国计量科学研究院
参加起草单位：北京无线电计量测试研究所

本规范主要起草人：

刘年丰（中国计量科学研究院）

王玉琢（中国计量科学研究院）

张爱敏（中国计量科学研究院）

参加起草人：

韩 红（北京无线电计量测试研究所）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 频率信号输出	(2)
5.2 秒脉冲 (1 PPS) 输出	(2)
5.3 谐波与非谐波失真	(2)
5.4 频率稳定度	(2)
5.5 相位噪声	(2)
5.6 相对频率偏差	(3)
5.7 日老化率	(3)
5.8 频率复现性	(3)
5.9 GNSS 驯服石英频标相对频率偏差	(3)
5.10 GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时偏差	(3)
5.11 GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时稳定度	(3)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 测量标准及其他设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 校准项目	(4)
7.2 校准方法	(5)
8 校准结果表达	(10)
9 复校时间间隔	(10)
附录 A 原始记录格式	(11)
附录 B 校准证书 (内页) 格式	(14)
附录 C GNSS 驯服石英频标校准证书 (内页) 格式	(16)
附录 D 主要校准项目不确定度评定示例	(18)

引 言

JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成制定本校准规范的基础性系列规范。

本规范是对 JJG 181—2005《石英晶体频率标准》的修订，主要修订内容如下：

- 原规程名称为《石英晶体频率标准》，现修改为《石英晶体频率标准校准规范》；
- 根据 JJG 2007—2015《时间频率计量器具》将“频率准确度”改为“相对频率偏差”；
- 增加谐波与非谐波失真、日老化率、复现性、秒脉冲幅度、秒脉冲宽度、秒脉冲抖动、秒脉冲定时偏差、秒脉冲定时稳定度的校准内容；
- 删除原规程中附录 A（相对平均频率偏差测量方法）；
- 删除原规程中附录 B（相位噪声测量方法）；

本规范历次版本发布情况为：

- JJG 181—2005；
- JJG 181—1989。

石英晶体频率标准校准规范

1 范围

本规范适用于石英晶体频率标准，包括 GNSS（全球导航卫星系统）驯服的石英晶体频率标准的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 2007 时间频率计量器具

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1180 时间频率计量名词术语及定义

JJF 1403 全球导航卫星系统（GNSS）接收机（时间测量型）校准规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；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 术语

3.1 定时偏差 timing offset

石英晶体频率标准输出 1 PPS 信号与标准 1 PPS 信号的偏差。

3.2 定时稳定度 timing stability

石英晶体频率标准输出 1 PPS 信号自身的一致程度。

4 概述

石英晶体频率标准（以下简称石英频标）具有优良的短期频率稳定性和相位噪声，主要由石英谐振器、振荡电路、隔离放大器、自动增益控制电路、恒温槽、精密温度控制电路和直流稳压电源等部分组成，工作原理如图 1 所示。

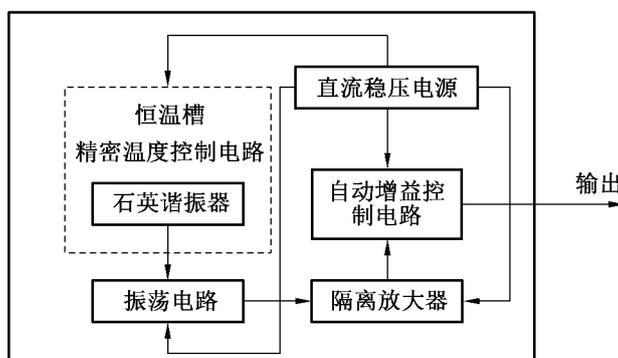


图 1 石英晶体频标工作原理

GNSS 驯服的石英频标输出频率受 GNSS 信号不断调节，具有更小的频率偏差，可达到原子频标的水平。石英频标广泛应用于工业生产、国防、科研和计量等部门。

5 计量特性

5.1 频率信号输出

频率：5 MHz、10 MHz、100 MHz；

幅度： ≥ 0.5 V (50 Ω 负载)。

5.2 秒脉冲 (1 PPS) 输出

脉冲幅度： ≥ 2.4 V (50 Ω 负载)；

脉冲宽度：20 μ s \sim 100 ms；

上升时间： ≥ 5 ns；

抖动： ≤ 1 ns。

5.3 谐波与非谐波失真

谐波： ≤ -40 dBc；

非谐波： ≤ -80 dBc。

5.4 频率稳定度

见表 1。

表 1 频率稳定度

τ	$\sigma_y(\tau)$
1 ms	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-11}$
10 ms	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-12}$
100 ms	$1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-13}$
1 s	$1 \times 10^{-10} \sim 5 \times 10^{-14}$
10 s	$1 \times 10^{-10} \sim 5 \times 10^{-14}$
100 s	$1 \times 10^{-10} \sim 5 \times 10^{-14}$

注： τ 表示取样时间， $\sigma_y(\tau)$ (阿仑标准偏差) 表示频率稳定度。

5.5 相位噪声

见表 2。

表 2 相位噪声

f	$\mathcal{L}(f)$ / (dBc/Hz)
1 Hz	-80 \sim -130
10 Hz	-90 \sim -150
100 Hz	-100 \sim -150
1 kHz	-140 \sim -178
10 kHz	-140 \sim -178
100 kHz	-140 \sim -178

注： f 表示傅里叶分析频率， $\mathcal{L}(f)$ 表示相位噪声。

- 5.6 相对频率偏差
 $\pm (1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-10})$ 。
- 5.7 日老化率
 $\pm (1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-12})$ 。
- 5.8 频率复现性
 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-12}$ 。
- 5.9 GNSS 驯服石英频标相对频率偏差
 $\pm (1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-13})$ ($\tau=1$ d)。
- 5.10 GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时偏差
 锁定模式 ($\tau=1$ d): $\pm (10 \text{ ns} \sim 1 \mu\text{s})$;
 保持模式 ($\tau=1$ d): $\pm (100 \text{ ns} \sim 100 \mu\text{s})$ 。
- 5.11 GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时稳定性
 $(1 \sim 200) \text{ ns}$ 。
- 注: 以上指标仅供参考, 不作为合格性判定的说明。

6 校准条件

- 6.1 环境条件
- 6.1.1 环境温度
 在 $18 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内任选一点, 温度最大允许变化 $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- 6.1.2 环境湿度
 相对湿度 $\leq 80\%$ 。
- 6.1.3 供电电源
 电压: $220 (1 \pm 10\%) \text{ V}$;
 频率: $50 (1 \pm 2\%) \text{ Hz}$ 。
- 6.1.4 其他
 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。
- 6.2 测量标准及其他设备
- 6.2.1 参考频标
 输出频率: 5 MHz 、 10 MHz 、 100 MHz ;
 频率稳定度: 优于被校石英频标相同取样时间频率稳定度的 $1/3$;
 相对频率偏差及日老化率: 优于被校石英频标 1 个量级;
 相位噪声: 比被校石英频标相同傅里叶分析频率的相位噪声至少小 10 dB 。
- 注: 参考频标可以选用一个或多个, 分别满足上述要求。
- 6.2.2 参考时间源
 输出: 1 PPS ;
 定时偏差: 优于被校石英频标定时偏差一个量级;
 定时稳定度: 优于被校石英频标定时稳定度的 $1/3$ 。
- 6.2.3 频标比对器
 输入频率: 5 MHz 、 10 MHz 、 100 MHz ;

测量带宽：应大于相应取样时间倒数的 5 倍；

能够测量和计算频率稳定度，比对不确定度（用阿仑标准偏差表示）优于被校石英频标相同取样时间的频率稳定度的 1/3。

6.2.4 相位噪声测量装置

输入频率：5 MHz、10 MHz、100 MHz；

傅里叶分析频率：1 Hz~100 kHz；

相位噪声本底：比被校石英频标相同傅里叶分析频率的相位噪声至少小 10 dB。

6.2.5 频谱分析仪

频率范围：1 MHz~100 MHz；

电平测量最大允许误差：±1 dB；

动态范围：≥100 dB。

6.2.6 时间间隔计数器

测量范围：1 ns~1 s，应有外接频标功能；

最大允许误差：±（|参考频标相对频率偏差|×被测时间间隔+1 ns）；

触发电平：在（0~5）V 范围内连续可调，并能指示电平值。

6.2.7 示波器

示波器带宽：≥500 MHz；

幅度测量最大允许误差：±5%。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 3。

表 3 校准项目

序号	项目名称
1	外观及工作正常性检查
2	频率信号输出幅度
3	秒脉冲（1 PPS）输出
4	谐波与非谐波失真
5	频率稳定度
6	相位噪声
7	相对频率偏差
8	日老化率
9	频率复现性
10	GNSS 驯服石英频标相对频率偏差
11	GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时偏差
12	GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时稳定度

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

1) 外观检查

前面板或后面板上应标有：仪器名称、型号、制造厂、出厂编号及电源要求。

电源开关、输入输出端口、功能设置开关等均应有识别标志，显示屏能正常显示工作参数。

各接口应牢固可靠、各功能旋钮应灵活可用，无影响工作的机械损伤。

2) 工作正常性检查

被校石英频标加电后，应用示波器进行检查各输出端有无相应的信号输出。

7.2.2 频率信号输出幅度

仪器连接如图 2 所示。

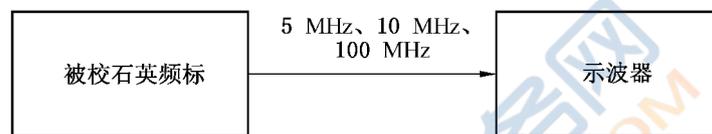


图 2 频率信号输出幅度校准

被校石英频标的 5 MHz、10 MHz 及 100 MHz 频率信号分别接入示波器，示波器的输入阻抗选为 $50\ \Omega$ ，测量输入信号的幅度值。

7.2.3 秒脉冲（1 PPS）输出

1) 秒脉冲（1 PPS）幅度及宽度



图 3 秒脉冲信号幅度校准

仪器连接如图 3。示波器的输入阻抗选为 $50\ \Omega$ ，调节示波器，使屏幕上显示稳定的脉冲波形，测量输入秒脉冲信号的幅度与宽度。

2) 秒脉冲（1 PPS）上升时间

仪器连接如图 3。调节示波器，使屏幕上显示稳定的脉冲波形且上升沿部分占水平方向半格以上，测量秒脉冲幅度从 10% 上升到 90% 所对应的时间间隔，此即为秒脉冲（1 PPS）上升时间。

3) 秒脉冲（1 PPS）抖动

仪器连接如图 4 所示。被校石英频标的秒脉冲接入时间间隔计数器，时间间隔计数器接外参考频标，设置为周期测量模式，触发电平为秒脉冲幅度的 50%，测量 100 个数据，计算其实验标准偏差作为秒脉冲抖动校准结果。校准结果计算公式见公式（1）。

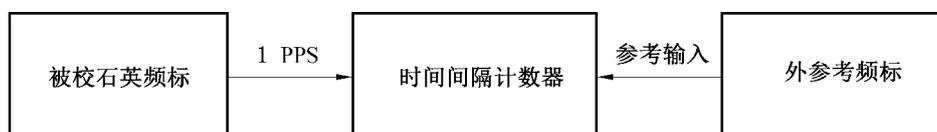


图 4 秒脉冲抖动校准

$$S_{\text{jitter}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中：

N —— 采样个数；

x_i —— 第 i 次测量的秒脉冲周期的值；

\bar{x} —— 测得的秒脉冲周期的平均值。

7.2.4 谐波与非谐波失真

仪器连接如图 5。被校石英频标的 5 MHz、10 MHz、100 MHz 信号分别接入频谱分析仪。

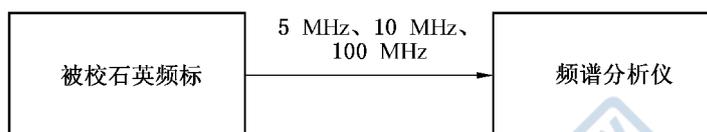


图 5 谐波和非谐波失真校准

1) 谐波失真

频谱分析仪的分辨力带宽 (RBW)、视频带宽 (VBW) 均设置为 1 kHz，合理设置频谱分析仪的起始和终止频率，分别测量基波频率功率电平及 n 次谐波频率的功率电平。

n 次谐波失真按公式 (2) 计算。

$$H_n = P_n - P_0 \quad (2)$$

式中：

P_0 —— 基波频率功率电平，dBm；

P_n —— n 次谐波（一般 n 取 2、3、4、5）频率功率电平，dBm；

H_n —— n 次谐波失真，dBc。

选取 H_n 最大值作为测量结果。

2) 非谐波失真

频谱分析仪的分辨力带宽 (RBW)、视频带宽 (VBW) 均设置为 1 kHz，合理设置频谱分析仪的起始和终止频率，测量基波功率电平及偏离载频 10 kHz 以外频偏范围内最大的非谐波功率电平。非谐波失真按公式 (3) 计算。

$$N = P_N - P_0 \quad (3)$$

式中：

P_0 —— 基波频率功率电平，dBm；

P_N —— 偏离载频 10 kHz 以外频偏范围内最大的非谐波功率电平，dBm；

N —— 非谐波失真，dBc。

7.2.5 频率稳定度

仪器连接如图 6 所示，其中被校石英频标的输出频率为 f_x ，参考频标的输出频率 f_r 为 5 MHz、10 MHz 或 100 MHz，取样时间和取样组数按表 4 选取，采用频标比对器直接测量阿仑标准偏差，作为频率稳定度结果。测量带宽应大于相应取样时间倒数的 5 倍。

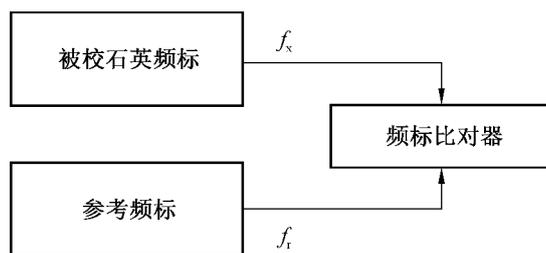


图 6 频标比对器法稳定度校准

表 4 取样时间和取样组数

取样时间 τ	取样组数 m
1 ms	≥ 100
10 ms	≥ 100
100 ms	≥ 100
1 s	≥ 100
10 s	≥ 100
100 s	≥ 50

7.2.6 相位噪声

仪器连接如图 7 所示。

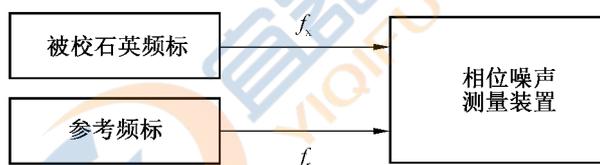


图 7 相位噪声校准

利用相位噪声测量装置分别测量石英频标自由和 GNSS 驯服两种状态下的相位噪声，傅里叶分析频率取 1 Hz~100 kHz。

在校准结果中给出相对于每个傅里叶分析频率的测量结果，或给出相位噪声随傅里叶分析频率的变化曲线。

7.2.7 相对频率偏差

1) 频标比对器法

仪器连接如图 6 所示，取样时间 $\tau \geq 10$ s，频标比对器直接测量相对频率偏差，作为校准结果。

2) 时差法

仪器连接如图 8 所示。



图 8 时差法相对频率偏差校准

参考频标和被校石英频标输出的秒脉冲分别输入到时间间隔计数器的启动和停止端口。时间间隔计数器测量两信号的相位时间差，测量结果为 ΔT_1 ，取样时间间隔 $\tau \geq 300$ s，再次测量结果为 ΔT_2 ，按公式（4）计算相对频率偏差：

$$y(\tau) = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\tau} \quad (4)$$

式中：

ΔT_1 、 ΔT_2 ——两次测量的相位时间差，s；

$y(\tau)$ ——相对频率偏差；

τ ——取样时间间隔，s。

7.2.8 日老化率

采用频标比对器或时差法进行测量，每 12 h 测量一次被校石英频标相对参考频标的相对频率偏差 $y_i(\tau)$ ，共测量 7 d，得到 15 个测量数据。按公式（5）和公式（6）计算日老化率 K 和相关系数 r 。

$$K = \frac{2 \sum_{i=1}^{15} [y_i(\tau) - \bar{y}(\tau)](t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^{15} (t_i - \bar{t})^2} \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{15} [y_i(\tau) - \bar{y}(\tau)](t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{15} [y_i(\tau) - \bar{y}(\tau)]^2 \sum_{i=1}^{15} (t_i - \bar{t})^2}} \quad (6)$$

式中：

t_i ——测量时序（1，2，…，15）；

$y_i(\tau)$ —— t_i 时刻测得的相对平均频率偏差；

$\bar{y}(\tau)$ ——日老化测量周期内每 12 h 测得的相对频率偏差测量值的算术平均值，

$$\bar{y}(\tau) = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} y_i(\tau)；$$

\bar{t} ——日老化测量时序算术平均值， $\bar{t} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} t_i$ 。

如果相关系数 $|r| \geq 0.6$ ，表明被校石英频标频率随时间线性变化显著，则校准结果给出日老化率 K ，附相对频率偏差变化曲线及拟合直线，并在校准结果中给出预热时间和相关系数；如果相关系数 $|r| < 0.6$ ，表明被校石英频标频率随时间变化线性不明显，则不给日老化率值，只给相对频率偏差变化曲线。

7.2.9 频率复现性

被校石英频标连续工作一段时间 T_1 后测得相对频率偏差 $y_1(\tau)$ ，断电一段时间 T_2 ，再开机一段时间 T_3 后测得相对频率偏差值 $y_2(\tau)$ ，取样时间 $\tau \geq 10$ s， $T_1 = T_3 =$ 石英频标规定的预热时间， $T_2 \geq 24$ h。按公式（7）计算频率复现性 R ：

$$R = |y_2(\tau) - y_1(\tau)| \quad (7)$$

相对频率偏差的测量可采用频标比对器法或时差法，具体可参见 7.2.7。

7.2.10 GNSS 驯服石英频标相对频率偏差

1) 驯服状态下相对频率偏差

将 GNSS 天线连接到被校石英频标 GNSS 天线输入端，待石英频标正常锁定 24 h 后，用频标比对器法或时差法连续测量 3 d，给出每天的相对平均频率偏差 $y_i(\tau)$ ，绝对值最大的相对平均频率偏差，为锁定状态下相对频率偏差。

2) 保持状态下相对频率偏差

被校石英频标锁定于 GNSS 信号状态 24 h 后，去掉 GNSS 天线，利用频标比对器法或时差法测量 1 d，得到的相对平均频率偏差为保持状态下相对频率偏差。

7.2.11 GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时偏差

仪器连接如图 9 所示，GNSS 驯服的石英频标与参考时间源接入时间间隔计数器前天线和电缆所引入的两路 1 PPS 信号时延差记为 T_D 。

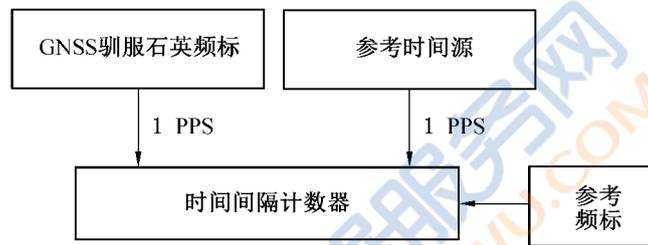


图 9 秒脉冲定时偏差校准

1) 驯服状态下秒脉冲定时偏差

石英频标正常锁定于 GNSS 信号后，由时间间隔计数器测量 GNSS 驯服石英频标与参考时间源 1 PPS 信号 24 h 时差算术平均值，记为 $\overline{\Delta t}$ ，按公式 (8) 计算石英频标锁定状态下的定时偏差 A_L 。

$$A_L = \overline{\Delta t} - T_D \quad (8)$$

式中：

T_D ——天线和电缆所引入信号时延差，ns；

$\overline{\Delta t}$ ——GNSS 驯服石英频标与参考时间源 1 PPS 信号 24 h 时差算术平均值。

2) 保持状态下秒脉冲定时偏差

当石英频标锁定于 GNSS 信号 24 h 后，去掉 GNSS 天线，测量石英频标与参考时间源 1 PPS 的时差序列 24 h 时差峰值记为 Δt_{\max} ，按公式 (9) 计算石英频标保持状态下的定时偏差 A_K 。

$$A_K = \Delta t_{\max} - T_D \quad (9)$$

式中：

T_D ——天线和电缆所引入信号时延差，ns；

Δt_{\max} ——保持状态下，GNSS 驯服石英频标与参考时间源 1 PPS 的时差序列 24 h 时差峰值。

7.2.12 GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时稳定度

仪器连接如图 9 所示。当石英频标正常锁定于 GNSS 信号后，由时间间隔计数器测量石英频标与参考时间频率源 1 PPS 信号 24 h 时差序列 Δt_i ，计算 24 h 时差序列实验

标准差 $s(\Delta t)$ ，则石英频标锁定状态下的定时稳定度为 $s(\Delta t)$ 。

8 校准结果表达

石英频标校准后，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。

9 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，推荐校准周期不超过 1 年。

附录 A

原始记录格式

A.1 外观及工作正常性检查

检查项目	结果
外观	
工作正常性	

A.2 频率信号输出幅度

频率/MHz	幅度/V	不确定度 $U/V(k=2)$
5		
10		
100		

A.3 秒脉冲输出

(1) 秒脉冲幅度与宽度

项目	测量值	不确定度 $U(k=2)$
幅度 U/V		
宽度 t_w/s		

(2) 秒脉冲上升时间

秒脉冲上升时间 $\Delta t/ns$	不确定度 $U/ns(k=2)$

(3) 秒脉冲抖动

秒脉冲抖动 $\Delta t/ns$	不确定度 $U/ns(k=2)$

A.4 谐波与非谐波失真

频率/MHz	谐波/dBc	非谐波/dBc	不确定度 $U/dB(k=2)$
5			
10			
100			

A.5 相位噪声

A.5.1 自由状态

载波频率：

f	$\mathcal{L}(f)/(\text{dBc}/\text{Hz})$	不确定度 $U/\text{dB}(k=2)$
1 Hz		
10 Hz		
100 Hz		
1 kHz		
10 kHz		
100 kHz		

A. 5.2 驯服状态

载波频率：

f	$\mathcal{L}(f)/(\text{dBc}/\text{Hz})$	不确定度 $U/\text{dB}(k=2)$
1 Hz		
10 Hz		
100 Hz		
1 kHz		
10 kHz		
100 kHz		

A. 6 频率稳定度

A. 6.1 自由状态

τ	带宽	$\sigma_y(\tau)$	不确定度 $U(k=2)$
1 ms			
10 ms			
100 ms			
1 s			
10 s			
100 s			

A. 6.2 驯服状态

τ	带宽	$\sigma_y(\tau)$	不确定度 $U(k=2)$
1 ms			
10 ms			
100 ms			
1 s			
10 s			
100 s			

A.7 日老化率

预热时间	相关系数	日老化率	不确定度 $U(k=2)$

曲线：

A.8 相对频率偏差

(1) 频标比对器法：

τ/s	$y(\tau)$	不确定度 $U(k=2)$

(2) 时差法：

$\Delta T_1/s$	$\Delta T_2/s$	τ/s	$y(\tau)$	不确定度 $U(k=2)$

A.9 频率复现性

$y_1(\tau)$	$y_2(\tau)$	R	不确定度 $U(k=2)$

A.10 GNSS 驯服石英频标相对频率偏差

工作状态	时间/d	相对平均频率偏差 $y(\tau)$	不确定度 $U(k=2)$
驯服	1		
	2		
	3		
	4		
保持	5		
	6		

A.11 GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时偏差

校准项	测量值	不确定度 $U(k=2)$
驯服状态下定时偏差		
保持状态下定时偏差		

A.12 GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时稳定度

校准项	测量值	不确定度 $U(k=2)$
驯服状态下定时稳定度		

附录 B

校准证书(内页)格式

B.1 外观及工作正常性检查

检查项目	结果
外观	
工作正常性	

B.2 频率信号输出幅度

频率/MHz	幅度/V	不确定度 $U/V(k=2)$
5		
10		
100		

B.3 谐波与非谐波失真

频率/MHz	谐波/dBc	非谐波/dBc	不确定度 $U/dB(k=2)$
5			
10			
100			

B.4 频率稳定度(带宽:)

τ	$\sigma_y(\tau)$	不确定度 $U(k=2)$
1 ms		
10 ms		
100 ms		
1 s		
10 s		
100 s		

B.5 相位噪声

载波频率:

f	$\mathcal{L}(f)/(dBc/Hz)$	不确定度 $U/dB(k=2)$
1 Hz		
10 Hz		
100 Hz		

表 (续)

f	$\mathcal{L}(f)/(\text{dBc}/\text{Hz})$	不确定度 $U/\text{dB}(k=2)$
1 kHz		
10 kHz		
100 kHz		

B.6 相对频率偏差

y	不确定度 $U(k=2)$

B.7 日老化率

预热时间:

相关系数:

日老化率	不确定度 $U(k=2)$

B.8 频率复现性

R	不确定度 $U(k=2)$

B.9 秒脉冲幅度与宽度

项目	测量值	不确定度 $U(k=2)$
幅度 U/V		
宽度 t_w/s		

B.10 秒脉冲上升时间

秒脉冲上升时间 $\Delta t/\text{ns}$	不确定度 $U/\text{ns}(k=2)$

B.11 秒脉冲抖动

秒脉冲抖动 $\Delta t/\text{ns}$	不确定度 $U/\text{ns}(k=2)$

附录 C

GNSS 驯服石英频标校准证书(内页)格式

C.1 外观及工作正常性检查

检查项目	结果
外观	
工作正常性	

C.2 频率信号输出幅度

频率/MHz	幅度/V	不确定度 $U/V(k=2)$
5		
10		
100		

C.3 秒脉冲幅度与宽度

项目	测量值	不确定度 $U(k=2)$
幅度 U/V		
宽度 t_w/s		

C.4 秒脉冲上升时间

秒脉冲上升时间 $\Delta t/ns$	不确定度 $U/ns(k=2)$

C.5 秒脉冲抖动

秒脉冲抖动 $\Delta t/ns$	不确定度 $U/ns(k=2)$

C.6 GNSS 驯服石英频标频率稳定度

取样时间 τ	驯服		自由	
	$\sigma_y(\tau)$	不确定度 $U(k=2)$	$\sigma_y(\tau)$	不确定度 $U(k=2)$
1 ms				
10 ms				
100 ms				
1 s				
10 s				
100 s				

C.7 GNSS 驯服石英频标单边带相位噪声

频偏 f	驯服		自由	
	$\mathcal{L}(f)$ dBc/Hz	不确定度 $U(k=2)$	$\mathcal{L}(f)$ dBc/Hz	不确定度 $U(k=2)$
1 Hz				
10 Hz				
100 Hz				
1 kHz				
10 kHz				
100 kHz				

C.8 GNSS 驯服石英频标相对频率偏差

工作状态	时间/d	相对平均频率偏差 $y(\tau)$	不确定度 $U(k=2)$
驯服	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
	7		
保持	8		
	9		

C.9 GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时偏差

校准项	测量值	不确定度 $U(k=2)$
驯服状态下定时偏差		
保持状态下定时偏差		

C.10 GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时稳定度

校准项	测量值	不确定度 $U(k=2)$
驯服状态下定时稳定度		

附录 D

主要校准项目不确定度评定示例

D.1 频率稳定度不确定度评定

测量方法见 7.2.5，其中参考频标为高稳晶振 8607、频标比对器为 VCH314，频标比对器测量示值阿伦标准偏差，作为被校频标的频率稳定度测量值。

D.1.1 不确定度来源

测量不确定度主要来源包括：

- 1) 参考频标输出频率不稳定引入的不确定度；
- 2) 频标比对器自身不稳定引入的不确定度；
- 3) 有限次测量引入的不确定度。

D.1.2 标准不确定度分量评定

- 1) 参考频标输出频率不稳定引入的不确定度分量 u_1

参考频标（高稳晶振 8607）平均时间为 1 s 时的频率稳定度测量值为 5.8×10^{-14} ，直接取阿伦标准偏差测量结果，则：

$$u_1 = 5.8 \times 10^{-14}$$

- 2) 频标比对器自身不稳定引入的不确定度分量 u_2

频标比对器 VCH314 技术说明书给出取样闸门时间为 1 s 时，比对不确定度为 3.0×10^{-14} ，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{3.0 \times 10^{-14}}{\sqrt{3}} = 1.7 \times 10^{-14}$$

- 3) 有限次测量引入的不确定度分量 u_3

采用 A 类方法进行评定，被校石英频标 1 s 频率稳定度测量结果为 2.1×10^{-13} ，阿伦标准偏差有限次测量次数 m 为 100，则：

$$u_3 = \frac{2.1 \times 10^{-13}}{\sqrt{100}} = 2.1 \times 10^{-14}$$

D.1.3 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 D.1。

表 D.1 频率稳定度的标准不确定度分量表

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
参考频标	u_1	A 类	—	—	5.8×10^{-14}
频标比对器	u_2	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	1.7×10^{-14}
有限次测量	u_3	A 类	正态	1	2.1×10^{-14}

D.1.4 合成标准不确定度

以上各分量互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 6.4 \times 10^{-14}$$

D.1.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c \approx 1.3 \times 10^{-13}$$

D.2 相对频率偏差不确定度评定

测量方法见 7.2.7，以时差法为例，铯原子频标 5071A 作为参考频标，采用时间间隔计数器 SR620 测量，取样时间间隔 $\tau=1$ d，则依据公式 (4) 计算出被校石英频标的相对频率偏差。

D.2.1 不确定度来源

测量不确定来源包括：

- 1) 参考频标输出频率不准确引入的不确定度；
- 2) 参考频标输出频率不稳定引入的不确定度；
- 3) 时间间隔计数器测量能力引入的不确定度；
- 4) 测量重复性引入的不确定度。

D.2.2 标准不确定度分量评定

- 1) 参考频标输出频率不准确引入的不确定度分量 u_1

依据铯原子频标 5071A 技术说明书，其相对频率偏差为 $\pm 5 \times 10^{-13}$ ，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{5 \times 10^{-13}}{\sqrt{3}} \approx 2.89 \times 10^{-13}$$

- 2) 参考频标输出频率不稳定引入的不确定度分量 u_2

依据铯原子频标 5071A 技术说明书，其日频率稳定度为 3×10^{-14} ，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{3 \times 10^{-14}}{\sqrt{3}} \approx 1.73 \times 10^{-14}$$

- 3) 时间间隔计数器测量能力引入的不确定度分量 u_3

时间间隔计数器 SR620 时间测量最大允许误差 ± 1 ns，取样时间 $\tau=1$ d 时，时差法测量频率最大允许误差 $\pm 1.16 \times 10^{-14}$ ，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，时差法测量 2 次，则：

$$u_3 = \frac{\sqrt{2} \times 1.16 \times 10^{-14}}{\sqrt{3}} = 9.47 \times 10^{-15}$$

- 4) 测量重复性引入的不确定度分量 u_4

采用 A 类方法进行评定，对被测石英频标的相对频率偏差连续独立测量 10 次，用贝塞尔法计算实验标准偏差。重复性测量数据见表 D.2。

表 D.2 重复性测量数据

序号	相对频率偏差 x_i
1	-5.50×10^{-9}
2	-5.42×10^{-9}
3	-5.43×10^{-9}
4	-5.37×10^{-9}
5	-5.40×10^{-9}
6	-5.41×10^{-9}
7	-5.39×10^{-9}
8	-5.40×10^{-9}
9	-5.43×10^{-9}
10	-5.45×10^{-9}
\bar{x}	-5.42×10^{-9}
$s_n(x)$	3.62×10^{-11}

不确定度分量：

$$u_4 = s_n(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \approx 3.62 \times 10^{-11}$$

D.2.3 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量表见表 D.3。

表 D.3 相对频率偏差的标准不确定度分量表

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
参考频标输出频率不准确	u_1	B类	均匀	$\sqrt{3}$	2.89×10^{-13}
参考频标输出频率不稳定	u_2	B类	均匀	$\sqrt{3}$	1.73×10^{-14}
时间间隔计数器测量能力	u_3	B类	均匀	$\sqrt{3}$	9.47×10^{-15}
测量重复性	u_4	A类	正态	1	3.62×10^{-11}

D.2.4 合成标准不确定度

以上各分量互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 3.6 \times 10^{-11}$$

D.2.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 7.2 \times 10^{-11}$$

D.3 相位噪声不确定度评定

测量方法见 7.2.6，其中以低噪声晶振为参考频标，相位噪声测量系统的直接测量值为被校石英频率标准输出信号单边带相位噪声校准值。

D.3.1 不确定度来源

测量不确定度来源包括：

- 1) 参考频标引入的不确定度；
- 2) 相位噪声测量装置引入的不确定度；
- 3) 读数误差引入的不确定度；
- 4) 测量重复性引入的标准不确定度。

D.3.2 标准不确定度分量评定

- 1) 参考频标引入的不确定度 u_1

参考频标选取低噪声晶振，其相位噪声小于被测石英频标相位噪声的 10 dB，其对测量结果的最大贡献为 ± 0.4 dB，即区间半宽度 $a = 0.4$ dB，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{0.4 \text{ dB}}{\sqrt{3}} \approx 0.23 \text{ dB}$$

- 2) 相位噪声测量系统引入的不确定度 u_2

相位噪声测量系统在傅里叶频率 $f \leq 100$ kHz 时引入的最大误差为 ± 2 dB，即区间半宽度 $a = 2$ dB，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{2 \text{ dB}}{\sqrt{3}} \approx 1.16 \text{ dB}$$

- 3) 读数误差引入的不确定度 u_3

根据经验，读数误差最大贡献为 ± 1 dB，即区间半宽度 $a = 1$ dB，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = \frac{1 \text{ dB}}{\sqrt{3}} \approx 0.58 \text{ dB}$$

- 4) 测量重复性引入的标准不确定度 u_4

采用 A 类方法进行评定，以载波频率为 10 MHz，傅里叶频率 $f = 1$ Hz 的相位噪声为分析点，连续独立测试 10 次，用贝塞尔法计算实验标准偏差。相位噪声重复性测量数据见表 D.4。

表 D.4 相位噪声重复性测量数据

序号	$\mathcal{L}(f=1 \text{ Hz})/(\text{dBc}/\text{Hz})$
	测量值 x_i
1	-117.5
2	-118.2
3	-118.1
4	-117.8
5	-117.5

表 D.4 相位噪声重复性测量数据 (续)

序号	$\mathcal{L}(f=1\text{ Hz})/(\text{dBc}/\text{Hz})$
	测量值 x_i
6	-118.3
7	-118.0
8	-117.9
9	-118.3
10	-117.7
\bar{x}	-117.9
$s_n(x)$	0.30

不确定度分量：

$$u_4 = s_n = 0.30 \text{ dB}$$

D.3.3 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 D.5。

表 D.5 相位噪声的标准不确定度分量表

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度 dB
参考频标	u_1	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.23
相位噪声测量系统	u_2	B类	均匀	$\sqrt{3}$	1.16
读数误差	u_3	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.58
测量重复性	u_4	A类	正态	1	0.30

D.3.4 合成标准不确定度

以上各分量互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 1.4 \text{ dB}$$

D.3.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 2.8 \text{ dB}$$

D.4 日老化率不确定度评定

测量方法见 7.2.8，其中铯原子频标 5071A 作为参考频标，假设其无漂移；采用时间间隔计数器 SR620 测量，则依据公式 (5) 计算出被校石英频标的日老化率。

D.4.1 不确定度来源

测量不确定度来源包括：

- 1) 参考频标输出频率不稳定引入的不确定度；
- 2) 时间间隔计数器测量能力引入的不确定度；
- 3) 日老化率估值算法引入的不确定度。

D.4.2 标准不确定度分量评定

1) 参考频标输出频率不稳定引入的不确定度分量 u_1

依据铯原子频标 5071A 技术说明书, 其日频率稳定度为 3×10^{-14} , 按 B 类方法评定, 设为均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_1 = \frac{3 \times 10^{-14}}{\sqrt{3}} \approx 1.73 \times 10^{-14}$$

2) 时间间隔计数器测量能力引入的不确定度分量 u_2

时间间隔计数器 SR620 时间测量最大允许误差 ± 1 ns, 取样时间 $\tau = 0.5$ d 时, 时差法测量频率最大允许误差 $\pm 2.32 \times 10^{-14}$, 按 B 类方法评定, 设为均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_2 = \frac{2.32 \times 10^{-14}}{\sqrt{3}} \approx 1.34 \times 10^{-14}$$

3) 日老化率估值算法引入的不确定度分量 u_3

校准时间为 7 d, 取样间隔 $\tau = 12$ h, 测量数据见表 D.6, 日老化率计算结果 $K = -3.56 \times 10^{-12}$ 。利用最小二乘法线性拟合, 设测量值为 $y_i(\tau)$, 线性拟合值为 $y'_i(\tau)$, 拟合直线斜率 K 按 A 类方法进行不确定度评定, 不确定度由下式计算:

$$u_3 = \sigma(K) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} (y_i - y'_i)^2}{13 \times \sum_{i=1}^{15} (t_i - \bar{t})^2}} \approx 3.02 \times 10^{-12}$$

表 D.6 相对频率偏差

序号	相对频率偏差 y_i
1	-1.015×10^{-8}
2	-1.015×10^{-8}
3	-1.016×10^{-8}
4	-1.016×10^{-8}
5	-1.017×10^{-8}
6	-1.017×10^{-8}
7	-1.017×10^{-8}
8	-1.018×10^{-8}
9	-1.018×10^{-8}
10	-1.018×10^{-8}
11	-1.019×10^{-8}
12	-1.019×10^{-8}
13	-1.019×10^{-8}
14	-1.019×10^{-8}
15	-1.019×10^{-8}

D.4.3 标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 D.7。

表 D.7 日老化率的标准不确定度分量

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
参考频标不稳定性	u_1	B类	均匀	$\sqrt{3}$	1.73×10^{-14}
时间间隔计数器测量能力不稳定	u_2	B类	均匀	$\sqrt{3}$	1.34×10^{-14}
日老化率估值算法	u_3	A类	正态	1	3.02×10^{-12}

D.4.4 合成标准不确定度

以上各分量互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 3.0 \times 10^{-12}$$

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 6.0 \times 10^{-12}$$

D.5 频率复现性不确定度评定

测量方法见 7.2.9，测量结果见表 D.8。

表 D.8 复现性测量结果

y_1 (τ)	y_2 (τ)
-5.43×10^{-9}	-5.31×10^{-9}

按公式 (7) 计算复现性： $R \approx 1.2 \times 10^{-10}$ 。

每次测量数据的测量不确定度可用相对频率偏差的测量不确定度值评定，两次开机频率偏差不确定度相同，频率复现性的合成校准不确定度如下（频率偏差不确定度数据见 D.2.4）：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + 2 \times u_3^2 + u_4^2} \approx 3.6 \times 10^{-11}$$

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c = 7.2 \times 10^{-11}$$

D.6 GNSS 驯服石英频标秒脉冲定时偏差不确定度评定

测量方法见 7.2.11，原子时标国家计量基准 UTC (NIM) 作为参考标准，采用时间间隔计数器 SR620 测量，得到被校石英频标的定时偏差测量值。

D.6.1 定时偏差不确定度来源

测量不确定度来源主要包括：

- 1) 参考时标定时偏差引入的不确定度；
- 2) 时间间隔计数器测量能力引入的不确定度；
- 3) 时间间隔计数器起始触发电平引入的不确定度；
- 4) 时间间隔计数器停止触发电平引入的不确定度；
- 5) 时间间隔计数器测量分辨力引入的不确定度；
- 6) 天线和电缆延迟引入的不确定度；

7) 测量重复性引入的不确定度。

D.6.2 定时偏差标准不确定度分量评定

1) 参考时标不准确引入的不确定度分量 u_1

参考时标不准确引入的误差为 ± 10 ns，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_1 = \frac{10 \text{ ns}}{\sqrt{3}} \approx 5.77 \text{ ns}$$

2) 时间间隔计数器测量能力引入的不确定度分量 u_2

时间间隔计数器 SR620 时间测量最大允许误差 ± 1 ns，按 B 类方法评定，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{1 \text{ ns}}{\sqrt{3}} \approx 0.58 \text{ ns}$$

3) 时间间隔计数器起始触发电平引入的不确定度 u_3

根据 SR620 使用说明书，其起始触发电平定时误差为 ± 0.055 ns，按 B 类方法评定，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_3 = \frac{0.055 \text{ ns}}{\sqrt{3}} \approx 0.032 \text{ ns}$$

4) 时间间隔计数器停止触发电平引入的不确定度 u_4

根据 SR620 使用说明书，其停止触发电平定时误差为 ± 0.055 ns，按 B 类方法评定，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_4 = \frac{0.055 \text{ ns}}{\sqrt{3}} \approx 0.032 \text{ ns}$$

5) 时间间隔计数器测量分辨力引入的不确定度 u_5

根据 SR620 使用说明书，其测量分辨力为 0.026 ns，按 B 类方法评定，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_5 = \frac{0.026 \text{ ns}}{\sqrt{3}} \approx 0.015 \text{ ns}$$

6) 天线和电缆延迟引入的不确定度 u_6

天线和电缆延迟引入误差为 ± 1 ns，即区间半宽度 $a = 1$ ns，按 B 类方法评定，设为均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_6 = \frac{1 \text{ ns}}{\sqrt{3}} \approx 0.58 \text{ ns}$$

7) 测量重复性引入的不确定度分量 u_7

采用 A 类方法进行评定，对被校石英频标的定时偏差连续独立测量 24 h（每小时 1 个点），用贝塞尔法计算实验标准偏差。重复性测量数据见表 D.9。

表 D.9 测量重复性

测量序号	定时偏差(x_i)
	ns
1	62.46
2	62.54
3	65.94
4	64.03
5	62.81
6	65.52
7	60.76
8	59.63
9	63.46
10	57.84
11	58.24
12	54.67
13	51.92
14	49.88
15	45.66
16	47.53
17	47.61
18	52.08
19	53.98
20	60.75
21	61.15
22	61.00
23	62.57
24	61.15
平均值 \bar{x}	58.05
$s_n(x)$	6.09

不确定度分量：

$$u_7 = s_n \approx 6.09 \text{ ns}$$

D.6.3 定时偏差标准不确定度分量表

各标准不确定度分量见表 D.10。

表 D.10 定时偏差的标准不确定度分量表

不确定度来源	不确定度分量	评定方法	分布	k 值	标准不确定度
参考时间源不准确	u_1	B类	均匀	$\sqrt{3}$	5.77 ns
时间间隔计数器测量能力	u_2	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.58 ns
时间间隔计数器起始触发电平	u_3	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.032 ns
时间间隔计数器停止触发电平	u_4	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.032 ns
时间间隔计数器测量分辨力	u_5	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.015 ns
天线和连接电缆延迟	u_6	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.58 ns
测量重复性	u_7	A类	正态	1	6.09 ns

D.6.4 合成标准不确定度

以上各分量互不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2} \approx 8.43 \text{ ns}$$

D.6.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = 2 \times u_c \approx 16.9 \text{ ns}$$

注：以上不确定度评定示例中，当测量环境符合环境校准要求时，环境影响引入的不确定度分量可忽略不计，不再单独列出。