



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 1004—2005

氢原子频率标准

Hydrogen Atomic Frequency Standards

2005 - 09 - 05 发布

2005 - 12 - 05 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

氢原子频率标准检定规程

**Verification Regulation of
Hydrogen Atomic Frequency Standards**

JJG 1004—2005

本规程经国家质量监督检验检疫总局 2005 年 9 月 5 日批准，并自 2005 年 12 月 5 日起施行。

归 口 单 位：全国时间频率计量技术委员会

起 草 单 位：中国计量科学研究院

本规程委托全国时间频率计量技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

高小珣 （中国计量科学研究院）

参加起草人：

于 肃 （中国计量科学研究院）

马凤鸣 （中国计量科学研究院）

目 录

1 范围	(1)
2 概述	(1)
3 计量性能要求	(2)
3.1 频率稳定度	(2)
3.2 频率漂移	(2)
3.3 频率准确度	(2)
3.4 相位噪声	(2)
3.5 频率温度特性	(2)
4 通用技术要求	(2)
4.1 外观标志	(2)
4.2 其他要求	(2)
5 计量器具控制	(3)
5.1 检定条件	(3)
5.2 检定项目和检定方法	(4)
5.3 检定结果的处理	(8)
5.4 检定周期	(9)
附录 A 检定证书和检定结果通知书	(10)

氢原子频率标准检定规程

1 范围

本规程适用于氢原子频率标准的首次检定、后续检定和使用中检验。

2 概述

氢原子频率标准（以下简称氢原子频标），分主动型和被动型两种；主动型的原子谐振器是自激产生原子跃迁频率的振荡信号，如图 1 所示；被动型的原子谐振器是在外界信号的激励下产生原子跃迁频率的振荡信号，如图 2 所示。两者都是通过一套变频锁相系统锁定一个晶体振荡器，振荡器输出频率与原子跃迁频率具有同样的准确度，供外界使用。

氢原子频标具有很高的稳定性和准确确定，主要用在通讯、定位导航、守时授时、航天测控及计量等领域。

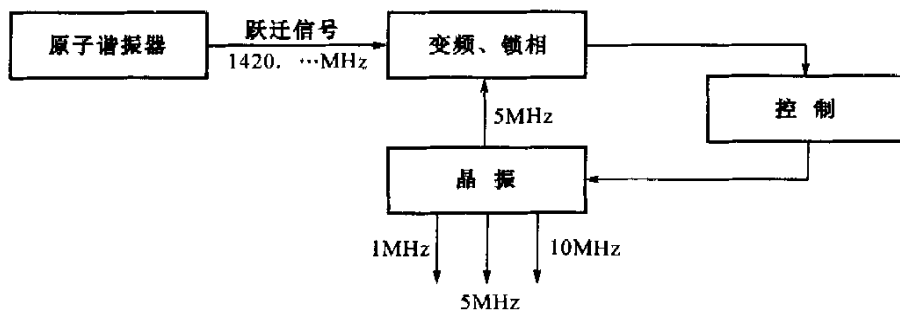


图 1 主动型氢原子频标

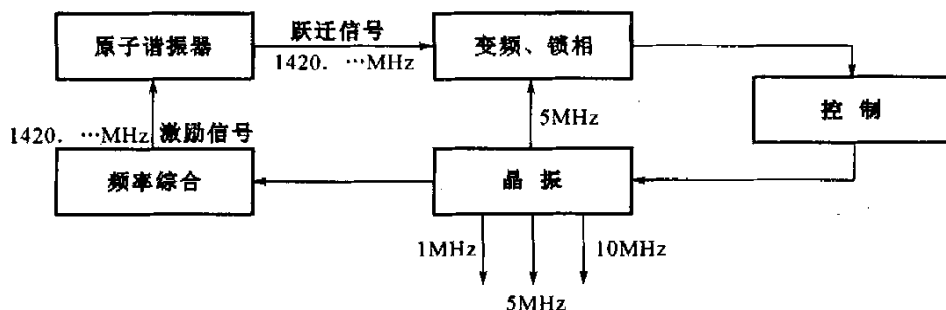


图 2 被动型氢原子频标

3 计量性能要求

3.1 频率稳定度

频率稳定度要求见表 1。

表 1 频率稳定度要求

τ	$\sigma_y(\tau)$
1 s	$2 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-13}$
10 s	$5 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-14}$
100 s	$2 \times 10^{-13} \sim 5 \times 10^{-15}$
1 h	$3 \times 10^{-14} \sim 2 \times 10^{-15}$
1 d	$3 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-15}$

3.2 频率漂移

$$\pm 1 \times 10^{-14}/d \sim \pm 1 \times 10^{-15}/d$$

3.3 频率准确度

$$5 \times 10^{-12} \sim 5 \times 10^{-13}$$

3.4 相位噪声

相位噪声要求见表 2。

表 2 相位噪声要求

f	$\mathcal{L}(f)$
10Hz	$-130\text{dBc/Hz} \sim -135\text{dBc/Hz}$
100Hz	$-135\text{dBc/Hz} \sim -145\text{dBc/Hz}$
1 000Hz	$-145\text{dBc/Hz} \sim -155\text{dBc/Hz}$

3.5 频率温度特性

在环境温度 $5^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 范围的, 温度系数 ($1/^\circ\text{C}$) $1 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-15}$ 。

4 通用技术要求

4.1 外观标志

氢原子频标的前面板或后面板上应标有: 名称、型号、制造厂、计量器具制造许可证标志及出厂序号。

4.2 其他要求

4.2.1 氢原子频标的电源开关、输入输出端口、其他功能设置开关和调节旋钮应有明确的识别标志。

4.2.2 每次送检时需携带仪器说明书，后续检定时还需携带上次的检定证书。

5 计量器具控制

计量器具控制包括首次检定、后续检定和使用中检验。使用中检验是在连续两次检定中间检查其检定证书是否有效，其计量性能指标，主要是频率准确度是否满足上次检定结果，频标的运行状态是否有明显变动。

5.1 检定条件

5.1.1 检定用设备

5.1.1.1 参考频标

参考频标应满足下列要求：

频率稳定度应优于被检氢原子频标的频率稳定度 3 倍；不能满足此要求时，可用同型号的频标，采用互比法，其结果除以 $\sqrt{2}$ 。

频率漂移和频率准确度应优于被检氢原子频标的漂移和准确度一个量级。

相位噪声应比被检氢原子频标的相位噪声小 10dB。

参考频标可以选用几个，分别满足上述要求。

5.1.1.2 频标比对器或频差倍增器

输入频率：1MHz，5MHz，10MHz。

用于测量取样时间 1s，10s，100s 和 1h 的频率稳定度。

频标比对器能直接给出测量结果。

频差倍增器要配备高分辨率频率计数器。

两者的测量最大允许误差（用二次取样的标准偏差表示）要比被检的氢原子频标的稳定度小 3 倍。

5.1.1.3 配有频差倍增器的比相仪

输入频率：1MHz，5MHz，10MHz。

用于测量取样时间 1h，1d 的频率稳定度，以及频率漂移和频率准确度。

比相仪可配有纸带记录仪或数字记录仪。

全套系统的测量不确定度要小于或等于 0.1ns。

5.1.1.4 相位噪声测量系统

输入频率：1MHz，5MHz，10MHz。

傅立叶频率范围：10Hz ~ 1kHz。

本底相位噪声： $\leq -160\text{dBc/Hz}$ 。

测量最大允许误差： $\pm 2\text{dB}$ 。

5.1.2 检定环境条件

5.1.2.1 环境温度

被检氢原子频标及检定用参考频标应放在恒温室内。

恒温室的温度可在（20℃ ~ 25℃）内设定某一值，温度最大允许变化范围： $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

5.1.2.2 环境湿度

相对湿度 $\leq 80\%$ 。

注：在检定证书中要标明检定时的环境温度和相对湿度。

5.1.2.3 供电电源

交流，220 (1 ± 10%) V，50 (1 ± 2%) Hz。

5.1.2.4 周围无影响正常检定的电磁干扰和机械振动。

5.2 检定项目和检定方法

5.2.1 检定项目

检定项目见表 3。

表 3 检定项目

项目名称	首次检定	后续检定	使用中检验
频率稳定度	+	+	-
频率漂移	+	+	-
频率准确度	+	+	+
相位噪声	+	+	-
注：“+”为应检项目，“-”为可不检项目。			

5.2.2 外观及工作正常性检查

5.2.2.1 外观按通用技术要求检查。

被检频标无影响工作的机械损伤。

各接口应牢固可靠。

各功能旋钮应灵活可用。

5.2.2.2 工作正常性检查

被检频标按说明书要求的时间预热后，粗测输出频率，确定已正常锁定。

确认被检频标已通过外观及工作正常性检查后，进行计量性能要求的检定或检验。

5.2.3 检定方法

5.2.3.1 取样时间 1s ~ 1h 的频率稳定度的检定

取样时间相应的取样组数见表 4。

表 4 取样时间与取样组数

取样时间 τ	取样组数 m
1s	100
10s	50
100s	30
1h	15
1d	15

(1) 直接用频标比对器测量

仪器连接如图 3 所示。

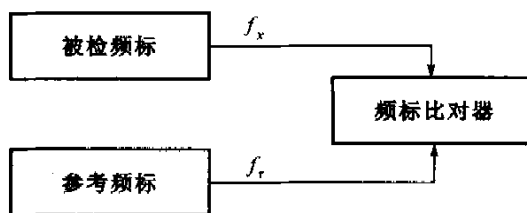


图 3 频率稳定度测量

图中： f_x ——被测频率，标称值可为 1MHz，5MHz，10MHz，100MHz；

f_r ——参考频率，标称值可为 1MHz，5MHz，10MHz，100MHz。

测量时，两者的标称值不一定相同。

频标比对器内含有计数器、微处理器。取样时间和取样组数按表 4 设定。比对器最后给出测量结果。

(2) 用频差倍增器加计数器测量

仪器连接如图 4 所示。

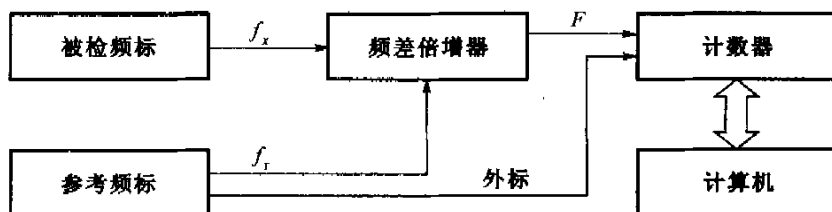


图 4 频率稳定度测量

频差倍增器输出信号加到计数器测频输入。

计数器采用外标，取自参考频标。

取样时间和取样组数按表 4 设定，按式 (1) 计算相对平均频率偏差：

$$y_i(\tau) = \frac{f_x - f_0}{f_0} = \frac{F_i - F_0}{Mf_0} \quad (1)$$

式中： F_i ——计数器每次测得的平均频率（闸门时间为 τ ）；

F_0 —— F_i 的标称值；

f_0 ——被检频标输出频率的标称值；

M ——频差倍增次数，不同的 f_0 对应不同的 M 。

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m [y_{i+1}(\tau) - y_i(\tau)]^2} \quad (2)$$

计算机最后给出频率稳定度测量结果。

5.2.3.2 频率漂移、频率准确度取样时间为 1h 和 1d 频率稳定度的检定

(1) 用比相仪测量

若被检频标与参考频标直接比相，则对于漂移率和稳定度的检定，测量分辨率不够，当取样时间为一天时，相对平均频率偏差的分辨率应优于 1×10^{-15} ，比相之前需进行频差倍增。等效倍增频率为 100MHz，仪器连接如图 5 所示。

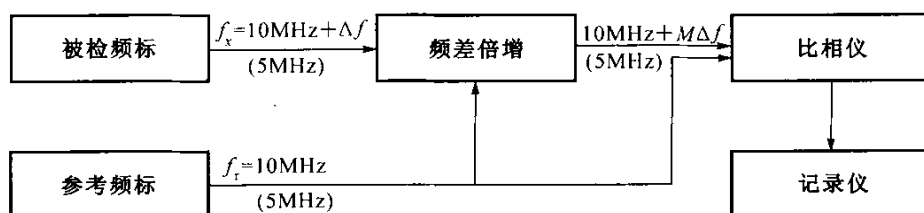


图 5 频率漂移、准确度及稳定度测量

相对平均频率偏差按式 (3) 计算：

$$y_i(\tau) = \frac{T_{i+1} - T_i}{M\tau} = \frac{\Delta T_i}{M\tau} \quad (3)$$

式中：τ——取样时间，ns；

T_i, T_{i+1} ——τ 的始末时刻测得的相位差值，ns；

共测 16 天；

M——Δf 的倍增次数。

若 f 的标称值为 10MHz，取 $M = 10$ ；

若 f 的标称值为 5MHz，取 $M = 20$ 。

a) 日漂移率的计算

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{16} (\Delta T_i - \overline{\Delta T}) \cdot (t_i - \bar{t})}{M\tau \sum_{i=1}^{16} (t_i - \bar{t})^2} \quad (4)$$

式中： $t_i = 1, 2, \dots, 16$ ，为 ΔT_i 值的测量时序，日；

$$\bar{t} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} t_i ;$$

$$\Delta T_i = T_{i+1} - T_i, \text{ ns};$$

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} \Delta T_i = \frac{1}{16} (T_{17} - T_1) ;$$

$$\tau = 1\text{d} = 86\,400 \times 10^9 \text{ ns}.$$

b) τ = 1h 的频率稳定度的计算

$$\sigma_y(1\text{h}) = \frac{1}{M\tau} \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (T_{i+2} - 2T_{i+1} + T_i)^2} \quad (5)$$

式中：\$m\$——取样组数，见表 2；

$$\tau = 1\text{h} = 3\,600 \times 10^9 \text{ ns}。$$

c) \$\tau = 1\text{d}\$ 的频率稳定度的计算

$$\sigma_y(1\text{d}) = \frac{1}{M\tau} \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (T_{i+2} - 2T_{i+1} + T_i - K\tau_i)^2} \quad (6)$$

式中：\$K\$——日漂移率；

$$\tau = 1\text{d} = 86\,400 \times 10^9 \text{ ns}。$$

d) 频率准确度的计算

计算 16 天的平均频率偏差。

$$y(16\text{d}) = \frac{T_{17} - T_1}{16 \times 86\,400 \times 10^9 \text{ ns}} = a \times 10^{-b} \quad (7)$$

式中，\$a\$ 取一位整数带一位小数，如 \$a = 1.3\$ 或 \$a = -2.5\$；\$b\$ 为实际计算出的指数。

$$\text{频率准确度 } A = (\text{取整 } |a| + 1) \times 10^{-b}。 \quad (8)$$

(2) 用数字式相位差计测量

若相位差计的测量分辨率能满足要求，可直接测量两信号的相位差。仍用上列计算公式计算各项指标，但 \$M = 1\$。

5.2.3.3 频率值的远距离校准

氢原子频标一般体积很大，搬运送检较困难，如用户只需求频率准确度时，可以用“GPS 共视法”间接测定频率偏差，基本原理如图 6 所示。

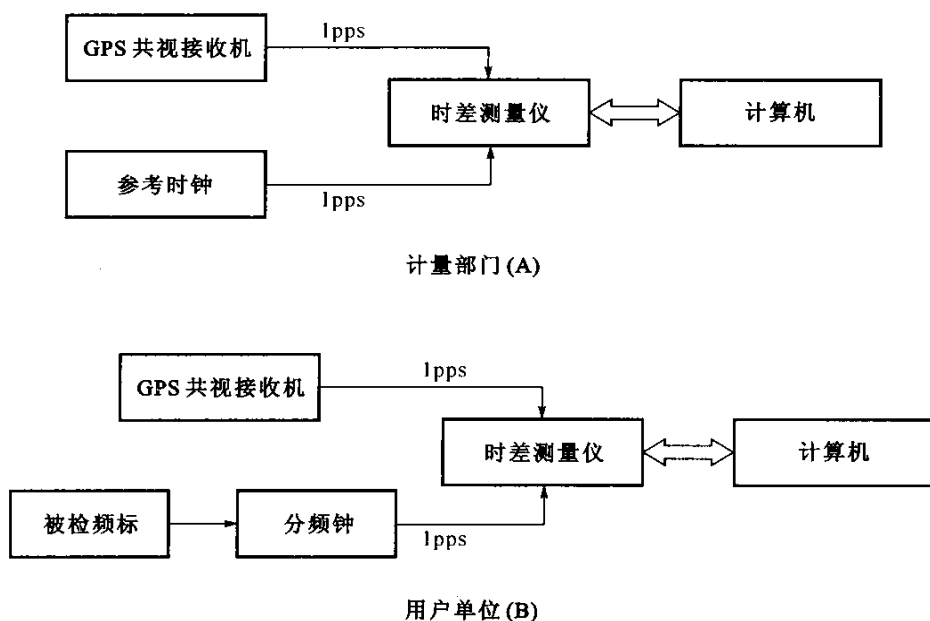


图 6 GPS 共视法校频

由计量部门编制共视时间表，A、B 两地同时自动测量各自的秒脉冲（1pps）与

GPS 时钟秒脉冲的时差, 通过数据交换由计算部门给出被校氢原子频标的相对平均频率偏差或准确度, 平均时间为 1 天或 10 天, 数据计算如下:

$$\overline{\Delta T}_{AG} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_{AGi}$$

$$\overline{\Delta T}_{BG} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_{BGi}$$

式中, ΔT_{AGi} 和 ΔT_{BGi} 分别为 A、B 两地每次测得的本地钟与 GPS 时间的时差 (每秒一次); n 为一天内的测量次数。

A、B 两地时钟第一天的平均时差为

$$\overline{\Delta T}_{AB1} = \overline{\Delta T}_{AG1} - \overline{\Delta T}_{BG1}$$

同法可得第二天的平均时差为

$$\overline{\Delta T}_{AB2} = \overline{\Delta T}_{AG2} - \overline{\Delta T}_{BG2}$$

被校氢原子频标相对计量标准一天的平均频率偏差为

$$y(\tau) = \frac{f_B - f_A}{f_A} = - \frac{\overline{\Delta T}_{AB2} - \overline{\Delta T}_{AB1}}{\tau} \quad (9)$$

式中, ΔT 的单位为 ns; $\tau = 86\,400 \times 10^9$ ns。

若计算 10 天的平均频率偏差: 取 $\tau = 10$ 天时, $\overline{\Delta T}_{AB1}$ 为第一天的值, $\overline{\Delta T}_{AB2}$ 为第 11 天的值。

$\overline{\Delta T}_{AB}$ 的标准不确定度小于 10ns, 则 $\tau = 1$ 天时, $y(\tau)$ 的标准不确定度小于 1×10^{-13} , $\tau = 10$ 天时, 为 1×10^{-14} 。

5.2.3.4 相位噪声的检定

仪器连接如图 7 所示。

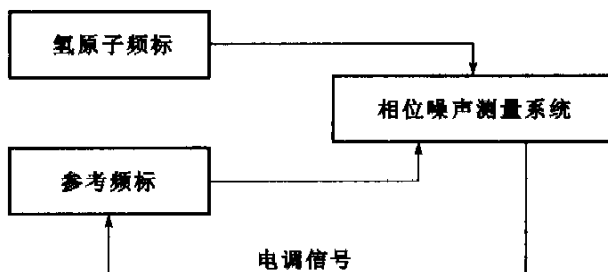


图 7 相位噪声的检定

参考频标采用压控的低噪声石英晶体振荡器, 电调信号是使输入到测量系统的两信号保持相位正交。

傅立叶频率分别取 10Hz, 100Hz, 1kHz, 每一频率点至少测量 4 次, 取其算术平均值, 作为该频率点处的相位噪声。

5.3 检定结果的处理

按本规程检定和要求, 检定合格的氢原子频标, 出具检定证书; 不合格的出具检定

结果通知书，并标明不合格项目。

5.4 检定周期

氢原子频标的检定周期一般不超过 1 年。

附录 A

检定证书和检定结果通知书

A.1 检定证书（内页）格式

一、频率稳定度

τ	$\sigma_y(\tau)$
1s	
10s	
100s	
1h	
1d	

二、频率日漂移率

三、频率准确度

四、相位噪声

f	$\mathcal{L}(f)$
10Hz	
100Hz	
1kHz	

A.2 检定结果通知书（内页）格式

要求同上，指出不合格项目。