



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 292—1996

铷原子频率标准

Rubidium Frequency Standards

1996-05-25 发布

1997-03-01 实施

国家技术监督局 发布

铷原子频率标准检定规程

Verification Regulation of

Rubidium Frequency Standards

JJG 292—1996
代替 JJG 292—1982

本检定规程经国家技术监督局于 1996 年 05 月 25 日批准，并自 1997 年 03 月 01 日起施行。

归口单位： 中国计量科学研究院

起草单位： 中国计量科学研究院

本规程技术条文由起草单位负责解释

本规程主要起草人：

赵良弼 （中国计量科学研究院）

黄玲妹 （中国计量科学研究院）

目 录

一 概述	(1)
二 技术要求	(1)
三 检定条件	(2)
四 检定项目和检定方法	(2)
(一) 外观及工作正常性	(2)
(二) 开机特性	(3)
(三) 漂移率	(3)
(四) 时域频率稳定度	(5)
(五) 频域频率稳定度	(7)
(六) 频率复现性	(8)
(七) 谐波及非谐波分量	(8)
(八) 频率准确度的校准和测量	(8)
五 检定结果的处理和检定周期	(8)

铷原子频率标准检定规程

本规程适用于使用中和修理后的铷原子频率标准（以下简称铷频标）的检定。

一 概 述

1 铷频标是一种被动型原子频标，是利用铷同位素 Rb^{87} 原子基态超精细结构中（0—0）跃迁微波谱线的中心频率，去控制晶体振荡器频率，从而得到高稳定度的标准频率源。它属于频率准确度需要定期校准的二级标准频率源，广泛应用于工程、科研及计量等领域。

二 技 术 要 求

2 输出频率：1 MHz，5 MHz，10（或 0.1）MHz；

3 频率漂移率

3.1 日漂移率 D_d ： $1 \times 10^{-11} \sim 6 \times 10^{-13}$ ；

3.2 月漂移率 D_m ： $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-11}$ ；

4 时域频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$ 如表 1。

表 1

取样时间 τ	$\sigma_y(\tau)$
1 s	$5 \times 10^{-11} \sim 5 \times 10^{-12}$
10 s	$2 \times 10^{-11} \sim 2 \times 10^{-12}$
100 s	$5 \times 10^{-12} \sim 5 \times 10^{-13}$
1 d	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-12}$

5 频域频率稳定度 $\mathcal{L}(f)$ 如表 2。

6 频率复现性 R ： $(5 \sim 2) \times 10^{-11}$ 。

7 开机特性 V ：开机 t_a 小时后，优于 5×10^{-11} ； t_a 及进入稳定的工作时间 t_w 按产品说明书规定。

8 谐波及非谐波分量

8.1 谐波分量：-（20~40）dBc；

8.2 非谐波分量：-（50~70）dBc；

表 2

傅里叶频率 f/Hz	$\mathcal{L}(f)/(\text{dBc} \cdot \text{Hz})$
10^0	$-70 \sim -90$
10^1	$-100 \sim -120$
10^2	$-110 \sim -125$
10^3	$-125 \sim -140$

9 频率准确度 $A: 2 \times 10^{-10} \sim 5 \times 10^{-11}$ 。

注：检定时以被检铷频标产品说明书为准。

三 检 定 条 件

10 环境条件

10.1 环境温度：可在 $(18 \sim 25)^\circ\text{C}$ 范围内任选一点，在检定过程中铷频标周围的环境温度的变化不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

10.2 相对湿度： $< 80\%$ 。

10.3 电源电压： $220(1 \pm 5\%) \text{ V}$ ； $50(1 \pm 5\%) \text{ Hz}$ 。

10.4 负载：在检定过程中，负载应固定不变。

11 检定用标准仪器及测量设备

11.1 频率漂移率及频率准确度的参考源，其指标应比被检铷频标相应指标至少高一个数量级。

11.2 时域频率稳定度参考源，其指标应比被检铷频标相应指标至少好 3 倍。

11.3 频域频率稳定度参考源，其单边带相位噪声应比被检铷频标相应指标至少低 10 dB，其频率应能压控。

11.4 频率漂移率及准确度的测量设备，其测量误差至少应比被检铷频标相应指标小一个数量级。

11.5 时域频率稳定度测量设备，其测量误差至少应小于被检铷频标频率稳定度的三分之一，测量设备的测量带宽应大于取样时间倒数的 5 倍。

11.6 频域频率稳定度测量设备，其单边带相位噪声应比被检铷频标的相应指标至少低 10 dB。

四 检 定 项 目 和 检 定 方 法

(一) 外观及工作正常性

12 被检铷频标不应有影响正常工作的机械损伤, 各种开关、按键灵活可靠, 各种标志清晰完整。

13 接通电源后, 铷频标频率应在规定时间内锁定。各工作指示应正常。

(二) 开机特性

14 开机特性 V 是指铷频标从开机一段时间 t_a 时的频率 f_{ta} 与达到稳定时 t_w 的频率 f_{tw} 之间的相对频差, 按式 (1) 计算:

$$V = \left| \frac{f_{ta} - f_{tw}}{f_0} \right| \quad (1)$$

式中: f_0 ——频率标称值。

15 频差倍增法

15.1 将被检铷频标和参考频标的输出信号分别与频差倍增器相应输入端相连, 频差倍增器的输出与通用计数器输入端相连, 如图 1。

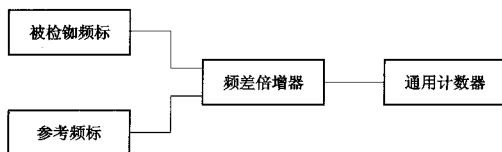


图 1

15.2 用通用计数器先后测出频差倍增器输出频率 f_{mta} 及 f_{mtw} , 取样时间 $\tau \geq 100$ s, 按式 (2) 计算。

$$V = \left| \frac{f_{mta} - f_{mtw}}{Mf_0} \right| \quad (2)$$

式中: f_{mta} 及 f_{mtw} ——分别为 t_a 及 t_w 时刻测得的经倍增后的频率;

M ——频差倍增倍数。

(三) 漂移率

16 铷频标在连续运行过程中, 频率值随时间的单方面变化称为漂移, 其中一阶漂移曲线的斜率称为漂移率。若单位时间为日, 称日漂移率; 为月, 称月漂移率。

17 日漂移率 D_d 用最小二乘法按式 (3) 或式 (3') 计算。

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n [y_i(\tau) - \bar{y}(\tau)](t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (3)$$

式中: $y_i(\tau)$ ——第 i 天测得的被检铷频标输出频率相对值;

τ ——取样时间, $\tau = 1 \text{ d} = 86\,400 \text{ s}$;

n ——取样个数;

t_i ——取样时序;

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

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

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \overline{\Delta T})(t_i - \bar{t})}{\tau \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (3')$$

式中: ΔT_i ——与第 i 天相对应的 τ 时间内测得的时刻差或相位差的变化量;

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i$$

18 比相法

18.1 将被检铷频标和参考频标的输出信号分别加到比相器相应输入端, 比相器输出电压(或电流)的变化就代表两比对信号之间相位差的变化, 用记录仪记录。如图 2。

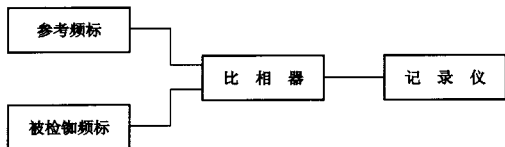


图 2

18.2 铷频标经预热 1 天后开始测量, 每天在同一时刻记录比相仪的相位差数 ΔT_i ; 连续测量 15 天, 按式 (3') 计算。也可将相位差 ΔT_i 换算成频率相对值 $y_i(\tau) = \frac{\Delta T_i}{\tau}$, 按式 (3) 计算。

19 时差法

19.1 将被检铷频标和参考频标的输出信号分别加到两台分频钟的输入端, 经分频钟分频后产生的秒脉冲信号分别作为通用计数器的开门信号和关门信号。如图 3。

19.2 铷频标经预热 1 天后开始测量, 每天在同一时刻用通用计数器测出两个秒脉冲之间的时刻差 T_i , 连续测量 15 天, 得 16 个值, 计算出相邻两天时刻差的变化量 $\Delta T_i = T_{i+1} - T_i$, 按式 (3') 计算。或换算成频率相对值 $y_i(\tau)$, 按式 (3) 计算。

20 相关系数 r 按式 (4) 或式 (4') 计算:

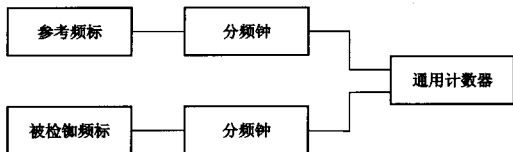


图 3

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [y_i(\tau) - \overline{y(\tau)}](t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [y_i(\tau) - \overline{y(\tau)}]^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} \quad (4)$$

或

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \overline{\Delta T})(t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \overline{\Delta T})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} \quad (4')$$

21 测量结束后, 绘出漂移曲线, 当 $n=15$, 如果相关系数 $|r| \geq 0.6$, 即漂移曲线具有明显的单方向性, 则根据计算出的日漂移率画出漂移直线, 并在检定结果中给出日漂移率及相关系数; 如果相关系数 $|r| < 0.6$, 即漂移曲线不具有明显的单方向性, 则只给漂移曲线。

22 月漂移率 D_m 可用比相法或时差法检定, 连续测量 7 个月, 按式 (3) 或式 (3') 计算, 式中取样时间 τ 为一个月, $y_i(\tau)$ 及 ΔT_i 分别为与第 i 个月相对应的频率相对值及 τ 时间内测得的时刻差或相位差的变化量。

根据被检铷频标产品说明书或送检单位的需要, 月漂移率可选检。

(四) 时域频率稳定度

23 频率稳定度是描述频标频率随机起伏的量。时域频率稳定度是指在某一时间间隔内平均频率的随机起伏程度。该时间间隔称为取样时间。时域频率稳定度用双取样方差 (阿仑方差) 的平方根值表示。

24 时域频率稳定度的检定, 取样时间与取样组数规定如表 3。

表 3

取样时间 τ	1 s	10 s	100 s	1 d
取样组数 m	100	50	30	14

25 频差倍增测频法

25.1 按图 1 连接。通用计数器功能开关置于“频率”位置，测量经倍增后的频率，所需的取样时间就是计数器的闸门时间，每个取样时间测 $m+1$ 个数，按式 (5) 计算。

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{Mf_0} \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(f_{i+1} - f_i)^2}{2m}} \quad (5)$$

式中： f_i, f_{i+1} ——第 i 和第 $i+1$ 次测得的频率值。

25.2 可用数据采集处理器代替通用计数器，从数据采集处理器上直接读出时域频率稳定度数值 $\sigma_y(\tau)$ 。

26 频差倍增测差频周期法

26.1 检定方法原理如图 4 或图 5。频差倍增器或倍频器输出信号，以及频率合成器输出信号分别与混频器的输入端相连。混频器输出的差频信号 $F - M\Delta f$ 加到通用计数器测周期输入端。

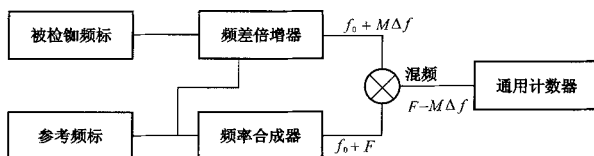


图 4

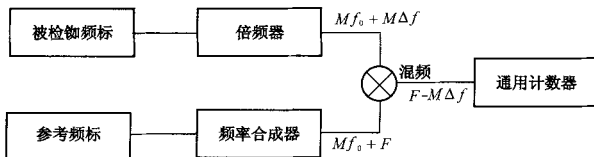


图 5

26.2 通用计数器功能开关置于“周期”位置，测量混频后的差频周期。用改变周期倍增系数获得所需的取样时间。当差频取 1 kHz 时，与周期倍增系数 10^3 及 10^4 相对应的取样时间分别为 1 s 及 10 s，各测 $m+1$ 个数，按式 (6) 或式 (6') 计算：

$$\sigma_y(\tau) = \frac{F}{\tau M f_0} \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(\tau_{i+1} - \tau_i)^2}{2m}} \quad (6)$$

或

$$\sigma_y(\tau) = \frac{P}{\tau^2 M f_0} \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(\tau_{i+1} - \tau_i)^2}{2m}} \quad (6')$$

式中： F ——差频；

P ——周期倍乘数；

τ ——取样时间， $\tau = \frac{P}{F}$ ；

τ_i 及 τ_{i+1} ——第 i 和第 $i+1$ 次测得的 P 倍差频周期值。

26.3 可用频率稳定度分析仪直接测出时域频率稳定度数值 $\sigma_y(\tau)$ 。

27 日频率稳定度用日漂移测得的数据按双采样方法（阿仑方差）公式计算。若日漂移率与日稳定度处于同一数量级，则在计算日频率稳定度时，应扣除漂移的影响，按式（7）计算。

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [y_{i+1}(\tau) - y_i(\tau) - D_d]^2}{2m}} \quad (7)$$

28 取样时间为 1 s, 10 s 及 1 d 的频率稳定度，必须进行检定；其余取样时间的频率稳定度，根据被检铷频标产品说明书或送检单位的需要选检。

（五）频域频率稳定度

29 频域频率稳定度是用各种谱密度来描述的，通常采用单边带相位噪声 $\mathcal{L}(f)$ 来表征。

30 正交鉴相法

30.1 鉴相法检定的原理如图 6。

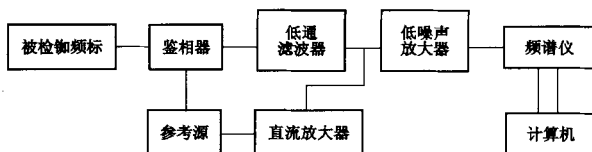


图 6

30.2 调整鉴相器使其处于正交并相位锁定。

30.3 设鉴相器的鉴相灵敏度为 K_d ，放大器的增益为 K_A ，频谱分析仪测得的功率谱密度为 $V_{rms}^2(f)$ ，则被检铷频标的单边带相位噪声 $\mathcal{L}(f)$ 按式（8）或式（9）计算：

$$\mathcal{L}(f) = \frac{1}{2 K_d^2 K_A^2} V_{rms}^2(f) \quad (8)$$

用对数表示：

$$\mathcal{L}(f) = 20 \lg V_{rms}(f) - 20 \lg K_d - 20 \lg K_A - 3 \quad (\text{dBc/Hz}) \quad (9)$$

式中： $V_{rms}(f)$ ——1 Hz 带宽内的均方根电压值；

f ——傅里叶频率，即偏离信号载频的频率。

30.4 测量时，傅里叶频率分别取 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz 和 1 kHz。

30.5 为了减少 $\mathcal{L}(f)$ 的测量误差，对每一傅里叶频率 f 的 $\mathcal{L}(f)$ 值，测量次数 n —

般取 16。

31 根据被检铷频标产品说明书或送检单位的需要, 频域频率稳定度可选检。

(六) 频率复现性

32 频率复现性 R 是指铷频标工作一段时间 t_1 后, 关机一段时间 t_2 , 再开机一段时间 t_3 时的频率值 f_{t3} 与关机前 t_1 时的频率值 f_{t1} 的相对频差, 按式 (10) 计算:

$$R = \left| \frac{f_{t3} - f_{t1}}{f_0} \right| \quad (10)$$

式中: f_{t1} 及 f_{t3} ——分别为 t_1 及 t_3 时的频率值。

33 频率复现性按 $t_1 = t_2 = t_3 = 24$ h 或按铷频标的产品说明书规定进行检定。测量 f_{t1} 和 f_{t3} 时, 取样时间 $\tau \geq 100$ s。

(七) 谐波及非谐波分量

34 将被检铷频标的输出端与频谱分析仪的输入端相连, 如图 7。



图 7

35 用频谱分析仪分别测出二次谐波、三次谐波及 $(0.3 \sim 3) f_0$ 范围内的非谐波相对于载波电平的分贝数。

36 根据被检铷频标产品说明书或送检单位的需要, 谐波及非谐波分量可选检。

(八) 频率准确度的校准和测量

37 频率准确度 A 是指被检铷频标频率标称值, 对其频率实际值的偏离程度, 按式 (11) 计算:

$$A = \frac{f_0 - f_x}{f_x} \approx \frac{f_0 - f_x}{f_0} \quad (11)$$

式中: f_x ——频率实际值。

38 被检铷频标在各项指标检定完毕后, 对其频率准确度进行测量。如果频率准确度不满足技术要求, 则要对其进行校准。

五 检定结果的处理和检定周期

39 按照本规程检定的铷频标, 如果各项检定项目全部达到技术要求者, 出具检定证书; 检定不合格者, 出具检定结果通知书, 并注明不合格的项目。

40 铷频标的检定周期为 1 年。