



中华人民共和国国家计量检定规程

JIG 492—1987

铯束原子频率标准

Cesium Beam Frequency Standard

1987-03-09 发布

1988-01-09 实施

国家计量局 发布

铯束原子频率标准检定规程

**Verification Regulation of Cesium
Beam Frequency Standard**

JJG 492—1987



本规程经国家计量局于1987年3月9日批准，并自1988年1月9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：

马凤鸣 （中国计量科学研究院）

参加起草人：

李巧真 （中国计量科学研究院）

苏蓉云 （中国计量科学研究院）

黄鹏宽 （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	(3)
(一) 检定用标准设备	(3)
(二) 环境条件	(4)
四 检定项目和检定方法	(4)
(一) 外观和正常工作检查	(4)
(二) C 场值的测定	(5)
(三) 频率稳定度时域表征的检定	(5)
(四) 频率稳定度频域表征的检定	(8)
(五) 频率温度特性的检定	(9)
(六) 频率准确度的检定和校准	(9)
五 检定结果的处理和检定周期	(10)
附录 检定结果	(11)

铯束原子频率标准检定规程

本规程适用于新制造（新购置的）、使用中和修理后的商品型铯束原子频率标准主要技术指标的检定。

一 概 述

铯束原子频率标准（以下简称铯束原子频标）是一种高准确的标准频率发生器。在各种时间频率系统中作为标准频率源，在检定铷原子频标及高稳定晶体振荡器时作为计量标准器具。

铯束原子频标是一种被动型原子频标，基本组成如图 1 所示。

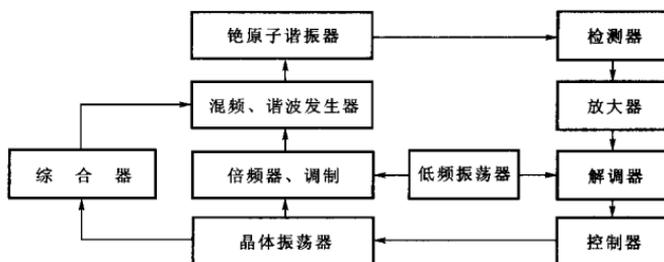


图 1

晶体振荡器的输出信号经综合、倍频、混频后产生微波激励信号，激励信号在原子谐振器内激励铯原子在其基态（0，0）超精细能级间的跃迁。低频振荡信号对微波激励信号进行调相。当激励信号的频率等于原子跃迁的中心频率时，跃迁几率最大，检测出的跃迁电流最强；偏离跃迁中心频率时，对检测信号解调后产生一个伺服控制电压，调整晶体振荡器的频率，使激励信号频率等于跃迁中心频率。此时晶振输出频率的准确度与原子跃迁频率的准确度相同，可作为标准频率使用。

铯束原子频标分实验室型和商品型两类。前者准确度高，能独立评定自身的准确度；后者准确度较低，需定期地利用前者通过检定进行验证或进行校准。本规程主要用于商品型铯束原子频标的检定。

二 技术要求

1 输出频率及其准确度

各种型号的铯束原子频标输出频率的标称值及其准确度如表 1 所列。

表 1

	HP 5061 A		XSC	B 3200	B 3210
	标准束管	优质束管			
输出频率/MHz	0.1, 1, 5	0.1, 1, 5	5	1, 5, 10	1, 5, 10
频率准确度	$\pm 1 \times 10^{-11}$	$\pm 7 \times 10^{-12}$	$\pm 7 \times 10^{-12}$	$\pm 1 \times 10^{-11}$	$\pm 7 \times 10^{-12}$

2 频率稳定度

2.1 时域表征——二次取样方差的平方根值

用 $\sigma_y(\tau)$ 表示, τ 为取样时间。具体指标如表 2 所列。

表 2

τ/s	$\sigma_y(\tau)$				
	HP 5061 A		XSC	B 3200	B 3210
	标准束管	优质束管			
10^{-3}	8.2×10^{-10}	8.2×10^{-10}			
10^{-2}	1.5×10^{-10}	1.5×10^{-10}			
10^{-1}			2×10^{-11}		2×10^{-11}
10^0	5.6×10^{-11}	5×10^{-12}	3×10^{-11}	3×10^{-11}	3×10^{-11}
10^1	2.5×10^{-11}	2.7×10^{-12}	1×10^{-11}	1×10^{-11}	1.5×10^{-11}
10^2	8×10^{-12}	8.5×10^{-13}	5×10^{-12}	3×10^{-12}	5×10^{-12}
10^3	2.5×10^{-12}	2.7×10^{-13}	2×10^{-12}		2×10^{-12}
10^4	8×10^{-13}	3.5×10^{-14}	5×10^{-13}		5×10^{-13}
10^5			3×10^{-13}	3×10^{-13}	3×10^{-13}

2.2 频域表征——单边带相位噪声

用 $\mathcal{L}(f)$ 表示, f 为偏离载频的频率。具体指标如表 3 所列。

表 3

f/Hz	$\mathcal{L}(f)$ (dBc/Hz)				
	HP 5061 A		XSC	B 3200	B 3210
	标准束管	优质束管			
10^{-3}	-8	-28	-8		
10^{-2}	-28	-48	-28		
10^{-1}			-48		
10^0	-82	-96	-80	-85	-80

表 3 (续)

f/Hz	$\mathcal{S}(f)$ (dBc/Hz)				
	HP 5061 A		XSC	B 3200	B 3210
	标准束管	优质束管			
10	-120	-120	-120	-125	-120
10^2	-125	-125	-140	-140	-140
10^3	-140	-140	-140	-140	-140

3 频率温度特性

当工作环境温度由 25℃ 变到 50℃ 或 0℃ 时, 频率相对变化量: XSC 型小于 $\pm 7 \times 10^{-12}$, 其他型号小于 $\pm 5 \times 10^{-12}$ 。

三 检定条件

(一) 检定用标准设备

4 频率准确度参考源

所用参考源的频率准确度应比被检频标的频率准确度高一个数量级。目前国内具备的参考源有下列三种:

4.1 时间频率基准器

即实验室型铯束原子频标 准确度优于 $\pm 7 \times 10^{-13}$ 。

4.2 原子时标

利用一组商品型铯束原子钟产生, 通过国际比对参加国际原子时合作。并利用其校准, 准确度优于 $\pm 7 \times 10^{-13}$ 。

4.3 氢原子频标

准确度优于 $\pm 1 \times 10^{-12}$, 可作为频率准确度为 $\pm 1 \times 10^{-11}$ 的铯束原子频标频率准确度检定时的参考源。

5 频率稳定度时域表征的参考源

参考源的频率稳定度应比被检频标的频率稳定度好 3 倍。对于不同取样时间推荐如下参考源:

5.1 取样时间 1ms ~ 10s

美国 HP 8662 A 频率综合器。

瑞士 OSCILLOQUARTZ 8601 晶体振荡器。

5.2 取样时间 100s ~ 1d

氢原子频率标准。

HP 5061 A 优质束管铯束原子频标, 可作为检定其他型号铯束原子频标的参考源。

6 频率稳定度频域表征的参考源

参考源的单边带相位噪声应比被检频标的单边带相位噪声低 10dBc/Hz，其频率值应能压控。推荐美国 AUSTRON1120L 晶体振荡器。

7 频率稳定度时域表征的测量设备

测量设备的测量误差（以二次取样方差的平方根值表示）应比被检频标的频率稳定度小 3 倍，测量带宽应大于取样时间倒数的 5 倍。推荐下列设备：

美国 HP 5390 A 频率稳定度分析仪。

国产 P 07 A 频标比对器。

美国 HP 5345 A 通用计数器。

美国 HPK 34 - 59991 A 线性比相仪。

美国 HP 680 M 笔式电压记录仪。

8 频率稳定度频域表征的测量设备

测量设备的单边带相位噪声应比被检频标的单边带相位噪声低 10dBc/Hz。推荐设备：

国内研制的 XZF 相位噪声测试仪。

美国 HP 3582 A 数字式频谱分析仪。

9 C 场测定设备

信号发生器，输出频率（10 ~ 100）kHz，分辨力为 1Hz。正弦波，幅度大于 1V（rms）。

电子计数器，测频范围（10 ~ 100）kHz，测量误差小于 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 。

10 频率温度特性的测量设备

温度可调的恒温箱，温度调整范围（10 ~ 30）℃，温度稳定期间的变化量小于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$

(二) 环境条件

11 环境应恒温，温度可选在（20 ~ 25）℃范围内，温度变化量应小于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

12 供电电源为 220（ $1 \pm 5\%$ ）V，50Hz。

13 周围环境的杂散磁场（磁感应强度）应小于 0.2mT。

四 检定项目和检定方法

(一) 外观和正常工作检查

14 被检频标不应有影响正常工作的机械损伤，输出输入接口应连接牢固。

15 正常工作检查

按频标说明书中指定的步骤分别对内部晶体振荡器及铯炉进行预热。

工作方式开关置于开环状态，用频差倍增器测量频标的输出频率，若频率的相对偏差大于 $\pm 3 \times 10^{-8}$ ，调整晶振频率粗调电位器，使偏差小于 $\pm 3 \times 10^{-8}$ ，并尽可能调小。

工作方式开关置于闭环状态，待正常工作指示灯亮后，用频差倍增器初测频标输出频率的准确度，其值应在给定指标的附近，表明频标能正常工作，可进行所有指标的检定。

(二) C 场值的测定

此项检定只在新购置的和修理后的 HP 5061 A 型铯束原子频标上进行。

16 电路检查开关 (circuit check) 置于控制电压 (control) 位置, 调整晶体振荡器的频率粗调电位器, 到表头指示为零。

17 工作方式开关 (mode) 置于 loop open, 调制开关 (mod) 置于 off, 电路检查开关置于 beam I。

18 仪器连接 (见图 2)。

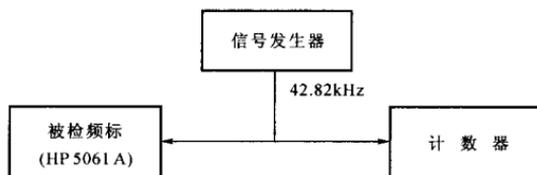


图 2

信号发生器的输出信号同时加到被检频标的塞曼跃迁 (Zeeman mod) 输入接口和计数器输入端, 调整输出频率使计数器测得值为 42.82kHz。

调整信号发生器的输出幅度, 由零开始到被检频标面板表头指示为最大。

调节 C 场电位器, 观察表头指示, 可看到三个峰值: 一个主峰, 指示最大; 两个边峰, 指示较小, 使电位器停在主峰对应的位置。微调信号发生器的频率, 使主峰达到最大, 测出此时的频率值, 应在 $42.82\text{kHz} \pm 100\text{Hz}$ 内。如不满足再仔细重复上述调整, 到满足为止。记下 C 场电位器的刻度值。

(三) 频率稳定度时域表征的检定

19 按照说明书, 使被检频标处在正常锁定工作状态。

20 取样时间与取样组数如表 4 所列:

取样可以有间隙, 间隙时间应小于 5s。

表 4

取样时间	1 ms	10 ms	100 ms	1 s	10 s	100 s	3 h	1 d
取样组数	100	100	100	100	100	30	30	15

测量带宽应大于取样时间倒数的 5 倍。

21 取样时间为 1ms ~ 100s 的频率稳定度的检定可用下述方法之一。

21.1 用 HP 5390 A 频率稳定度分析仪

a. 频差法

仪器连接如图 3 所示。

当取样时间为 10s 和 100s 时, 用氢原子频标的 5MHz 频率作为频率综合器的外标输入。

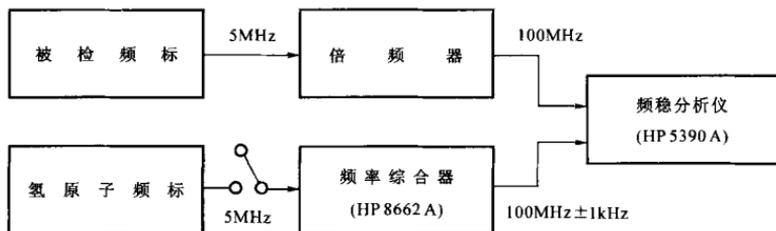


图 3

频稳分析仪内 HP 5345 A 计数器的功能开关置于周期位置，闸门时间分别选取 1ms，10ms，100ms，1s，10s 和 100s。每一取样时间的取样组数按表 4 所列，以 m 表示。

设每一取样时间为 τ ，每次测得的值为 τ_i ，共测 $m+1$ 个。按下式计算频率稳定度：

$$\begin{aligned}\sigma_y(\tau) &= \frac{10^3}{10^8 \times \tau \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (\tau_{i+1} - \tau_i)^2}} \\ &= \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (\tau_{i+1} - \tau_i)^2} \times 10^{-5}\end{aligned}\quad (1)$$

b. 双混频时差法

仪器连接如图 4 所示。

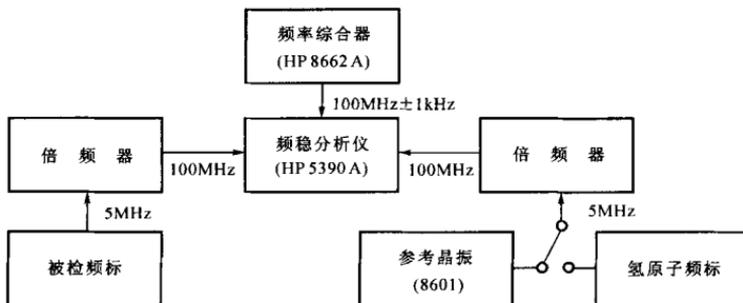


图 4

当取样时间为 10s 和 100s 时，参考源用氢原子频标，其余用 8601 晶振。

利用频稳分析仪内的计数器测量综合器输出频率与倍频后的参考频率和被检频率差的相位差，相邻两次测量的间隙即为所需的取样时间，由频稳分析仪内的计算机控制。

设取样时间为 τ ，每次测得的相位差为 ΔT_i （以秒为单位），共测 $m+2$ 个， m 为表

4 中所列的取样组数。按下式计算频率稳定度：

$$\begin{aligned} \sigma_y(\tau) &= \frac{10^3}{10^8} \times \tau \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (\Delta T_{i+2} - 2\Delta T_{i+1} + \Delta T_i)^2} \\ &= \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (\Delta T_{i+2} - 2\Delta T_{i+1} + \Delta T_i)^2} \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (2)$$

21.2 用 P 07 A 频标比对器

仪器连接如图 5

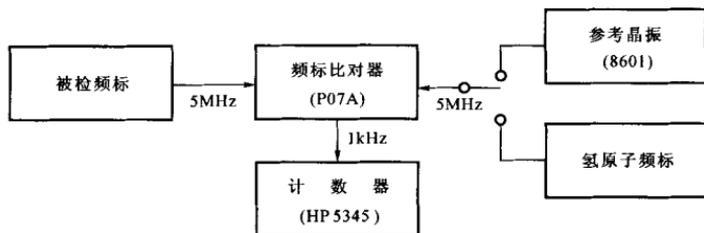


图 5

当取样时间为 1ms ~ 1s 时，参考源用 8601 晶振；取样时间为 10s 和 100s 时，参考源用氢原子频标。

参考源的输出频率加到频标比对器的参考输入端，被检频标的输出频率加到被测输入端。频标比对器的等效倍增频率选在 100MHz，输出频率为 1kHz，用 HP 5345A 计数器测量。

计数器的功能开关置于周期位置，闸门时间分别选取所需的取样时间。每一取样时间下，计数器测得值的个数为 $m+1$ ，不同取样时间对应的 m 值如表 4 所列。设取样时间为 τ ，每次测得值为 τ_i ，按公式 (1) 计算频率稳定度。

21.3 除上述推荐的三种方法外，只要满足检定条件中的规定，也可用其他方法。

22 取样时间为 3h 和 1d 的频率稳定度的检定

22.1 用比相法。仪器连接如图 6 所示。

为提高比相系统的测量精度加一级频差倍增器。比相仪输入频率的标称值均为 5MHz，记录仪的满度代表的相位差为 2ns。

设取样时间为 τ ，在取样时间的始、末时刻测得的相位差值分别为 ΔT_i 和 ΔT_{i+1} ，则平均频率偏差为：

$$y_i(\tau) = \frac{\Delta T_{i+1} - \Delta T_i}{10\tau}$$

为保证所要求的测量精度，取样时间的误差应小于 10^{-3} 。

设一共测得 $m+2$ 个相位差值，不同取样时间对应的 m 值见表 4。按下式计算频率稳定度：

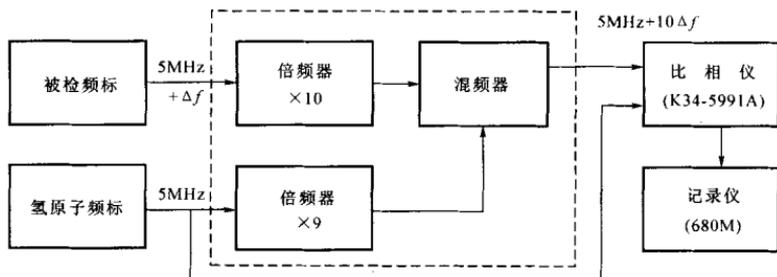


图 6

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{10\tau} \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (\Delta T_{i+2} - 2\Delta T_{i+1} + \Delta T_i)^2} \quad (3)$$

22.2 只要满足检定条件中的规定，也可用其他方法进行检定。

(四) 频率稳定度频域表征的检定

23 仪器连接 (图 7)

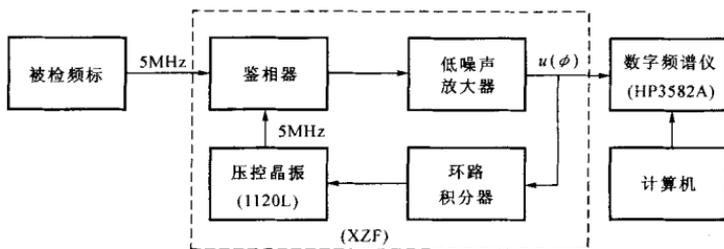


图 7

相位噪声测试仪内的压控晶振即为参考源，采用美国 AUSTRON 公司的 1120L 晶体振荡器。若满足检定条件中的规定，也可用其他晶振。

鉴相器的鉴相灵敏度为 K_d ，放大器的增益为 K_A 。利用数字频谱分析仪测量相位噪声测试仪输出电压的功率谱密度。测量时所选的傅立叶频率点（偏离被检频标输出信号载频的频率）分别取 10Hz, 100Hz, 1kHz, 10kHz。

设 f 代表傅立叶频率，频谱仪测得的功率谱密度为 $u_{rms}(f)$ ，则被检频标的相位起伏谱密度为：

$$S_\phi(f) = \frac{1}{K_d^2 \cdot K_A^2} u_{rms}^2(f)$$

频率稳定度的频域表征（单边带相位噪声）为：

$$\mathcal{L}(f) = \frac{1}{2} S_{\phi}(f) = \frac{1}{2K_d^2 K_A^2} u_{\text{rms}}^2(f) \quad (4)$$

用对数表示:

$$\mathcal{L}(f) \text{ dBc/Hz} = 20\lg u_{\text{rms}}(f) - 20\lg K_d - 20\lg K_A - 3 \quad (\text{dBc/Hz}) \quad (5)$$

式中: $u_{\text{rms}}(f)$ ——1Hz 带宽内的均方根电压值。

为减小 $\mathcal{L}(f)$ 的不确定度, 对每一傅立叶频率的 $\mathcal{L}(f)$ 值测量 32 次, 然后取其算术平均值, 作为该频率点的单边带相位噪声。

(五) 频率温度特性的检定

此项检定只对新购置和修理后的频标。

24 仪器的连接如图 8。

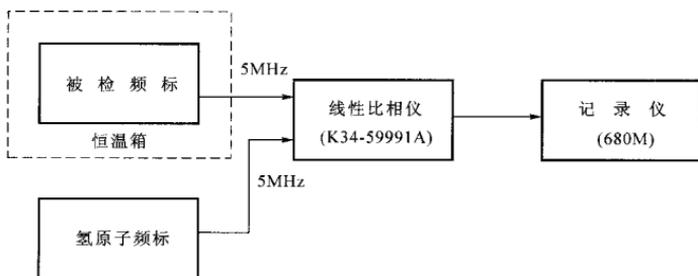


图 8

24.1 被检频标置于温度可调的恒温箱内温度调在 10°C , 保持稳定。用比相法测出两频标的相对频差, 取样时间为 1d。设测得的相对频差为 $y_1(\tau)$ 。

24.2 温度调到 20°C , 同法测量一天内的相对平均频率偏差, 记为 $y_2(\tau)$ 。

24.3 温度调到 30°C , 同法测得 $y_3(\tau)$ 。

则温度由 20°C 变到 10°C 时, 相对频率的变化量为

$$\Delta y_1(\tau) = y_1(\tau) - y_2(\tau) \quad (6)$$

温度由 20°C 变到 30°C 时, 相对频率的变化量为:

$$\Delta y_2(\tau) = y_3(\tau) - y_2(\tau) \quad (7)$$

(六) 频率准确度的检定和校准

25 用比相法, 仪器连接如图 9。

参考源可用实验室型铯束时间频率基准或原子时标。对于准确度为 $\pm 1 \times 10^{-11}$ 的被检频标, 也可用氢原子频标作参考源。

取样时间为 1d, 测量在取样时间始、末时刻的相位差 ΔT_1 和 ΔT_2 , 用下式计算频率准确度。

$$y(\tau) = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\tau} \quad (8)$$

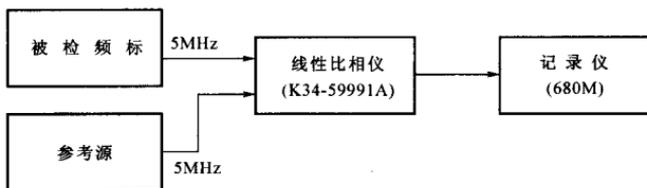


图 9

式中： $\tau = 86\,400\text{s}$ 。

如果被检频标是在使用一段时间后或修理后的检定，准确度若不合格，可通过调节 C 场电位器进行校准。对于 $\pm 1 \times 10^{-11}$ 的频标可校准到优于 $\pm 8 \times 10^{-12}$ ，对于 $\pm 7 \times 10^{-12}$ 的频标可校准到优于 $\pm 5 \times 10^{-12}$ 。但结果仍给 $\pm 1 \times 10^{-11}$ 和 $\pm 7 \times 10^{-12}$ 。

五 检定结果的处理和检定周期

- 26 对检定合格的发给检定证书，检定不合格的发给检定结果通知书，并指出不合格项目。
- 27 检定周期不得超过 1 年。

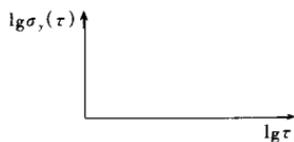
附录

检定结果

- 一 频率准确度
- 二 C 场刻度值
- 三 频率稳定度

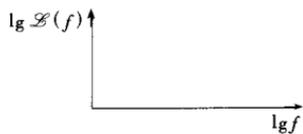
1 时域表征——二次取样的均方根值

τ	$\sigma_y(\tau)$
1ms	
10ms	
100ms	
1s	
10s	
100s	
3h	
1d	



2 频域表征——单边带相位噪声

f/Hz	$\mathcal{S}(f)/(\text{dBc}/\text{Hz})$
10	
100	
1 000	
10 000	



四 频率温度特性

1 环境温度由 20℃ 变到 10℃ 时

频率变化量为：

2 环境温度由 20℃ 变到 30℃ 时

频率变化量为：

五 面板表头指示值

开关位置	表头指示值