



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 492—2009

铯原子频率标准

Cesium Atomic Frequency Standards

2009—05—18 发布

2009—11—18 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

铯原子频率标准检定规程

Verification Regulation of
Cesium Atomic Frequency Standards

JJG 492—2009
代替 JJG 492—1987

本规程经国家质量监督检验检疫总局于 2009 年 5 月 18 日批准，并自 2009 年 11 月 18 日起施行。

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：航天科工集团二院二〇三所

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：

张爱敏（中国计量科学研究院）

参加起草人：

王伟波（中国计量科学研究院）

宁大愚（中国计量科学研究院）

徐月青（航天科工集团二院二〇三所）

西安同步电子科技有限公司

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 概述	(1)
4 计量性能要求	(1)
4.1 输出频率及幅度	(1)
4.2 频率稳定度	(1)
4.3 相位噪声	(2)
4.4 频率准确度	(2)
4.5 频率调整	(2)
4.6 谐波与非谐波失真	(2)
4.7 秒脉冲(1PPS)输出	(2)
4.8 时钟同步	(3)
5 通用技术要求	(3)
5.1 外观标志	(3)
5.2 其他要求	(3)
6 计量器具控制	(3)
6.1 检定条件	(3)
6.2 检定项目和检定方法	(4)
6.3 检定结果的处理	(9)
6.4 检定周期	(9)
附录 A 两种频标比对器原理	(10)
附录 B 检定证书(内页)格式	(12)
附录 C 检定结果通知书(内页)格式	(14)

铯原子频率标准检定规程

1 范围

本规程适用于铯原子频率标准（含铯原子钟）的首次检定、后续检定和使用中检验。

2 引用文献

JJF 1001—1998 通用计量术语及定义

JJF 1180—2007 时间频率计量名词术语及定义

JJG 2007—2007 时间频率计量器具检定系统表

使用本规程时，应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 概述

铯原子频率标准（以下简称铯频标）是一种被动型原子频标，由物理部分（铯原子谐振器）及电路部分组成。谐振器内铯原子在微波激励信号感应下发生能级跃迁；电路部分包含石英晶体振荡器、倍频综合器和频率控制电路。频率控制电路用于调整石英晶体振荡器的频率，将其输出频率锁定到铯原子的跃迁频率。基本原理如图 1 所示。

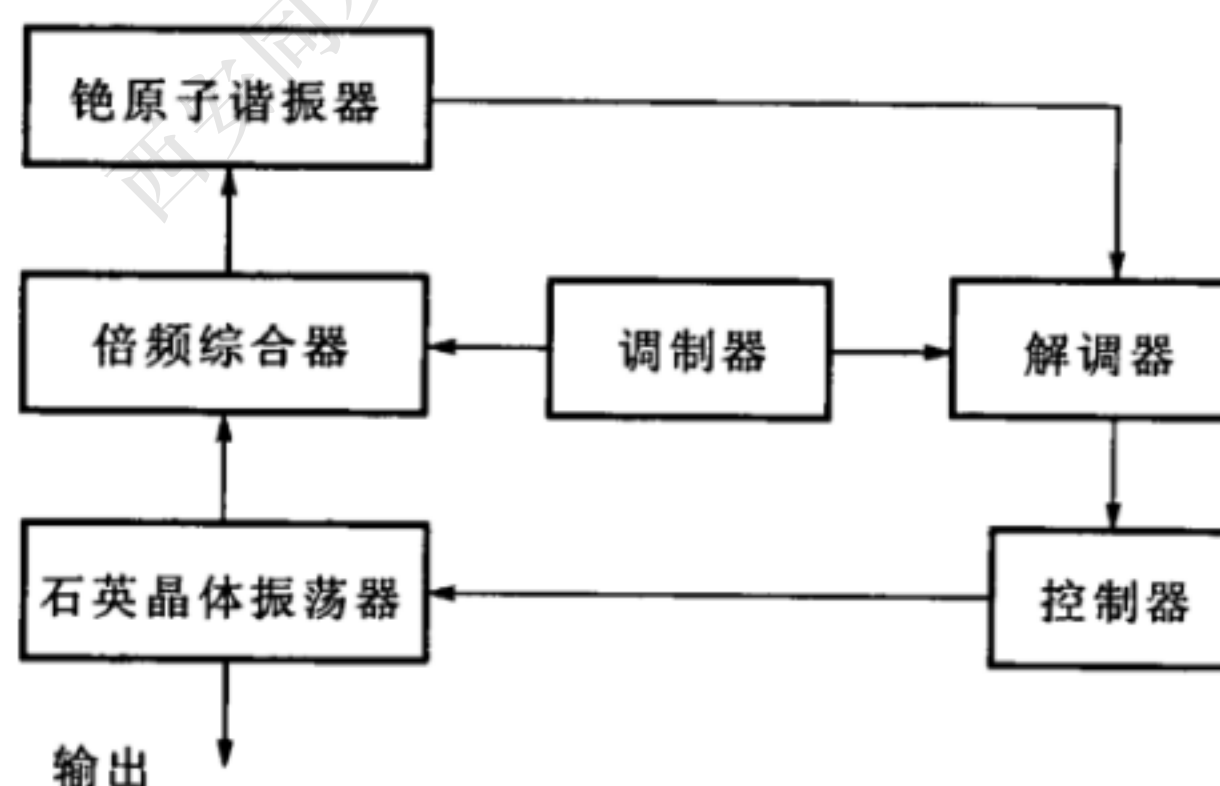


图 1 铯原子频率标准原理

配有数字时间指示的铯频标又称为铯原子钟。

铯频标和铯原子钟具有很高的频率准确度，广泛应用于科研、国防、通讯、导航、计量等领域。

4 计量性能要求

4.1 输出频率及幅度

频率：5MHz，10MHz

幅度： $\geq 1\text{V}$ (50 Ω)

4.2 频率稳定度

见表 1， τ 表示取样时间， $\sigma_y(\tau)$ （阿仑标准偏差）表示频率稳定度。

表 1 频率稳定度要求

τ	$\sigma_y(\tau)$
10ms	$2 \times 10^{-10} \sim 7 \times 10^{-11}$
100ms	$5 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-11}$
1s	$3 \times 10^{-11} \sim 5 \times 10^{-12}$
10s	$1 \times 10^{-11} \sim 3 \times 10^{-12}$
100s	$3 \times 10^{-12} \sim 8 \times 10^{-13}$
1000s	$1 \times 10^{-12} \sim 2 \times 10^{-13}$
10000s	$3 \times 10^{-13} \sim 8 \times 10^{-14}$
1d	$2 \times 10^{-13} \sim 3 \times 10^{-14}$

4.3 相位噪声

见表 2, f 表示傅立叶分析频率, $\mathcal{L}(f)$ 表示相位噪声。

表 2 相位噪声要求

f	$\mathcal{L}(f)$ (dBc/Hz)
1Hz	-90~-106
10Hz	-120~-136
100Hz	-130~-151
1kHz	-140~-156
10kHz	-145~-160
100kHz	-145~-160

4.4 频率准确度

$1 \times 10^{-11} \sim 2 \times 10^{-13}$

4.5 频率调整

范围: $\pm 1 \times 10^{-9}$

分辨力: $1 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-14}$

4.6 谐波与非谐波失真

谐波: ≤ -40 dBc

非谐波: ≤ -80 dBc

4.7 秒脉冲 (1PPS) 输出

脉冲幅度: ≥ 2.4 V (50 Ω)

脉冲宽度: ≤ 20 μ s

上升时间: ≤ 5 ns

4.8 时钟同步

4.8.1 自动同步

同步秒脉冲：脉冲幅度：2V~10V

脉冲宽度：100ns~100μs

上升时间：≤50ns

最大同步误差：±50ns

4.8.2 手动同步

范围：-0.5s~+0.5s

分辨力与最大同步误差：±50ns

说明：检定时计量性能要求以被检铯频标（或铯原子钟）说明书的技术指标为准。

5 通用技术要求

5.1 外观标志

铯频标的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。

铯频标的电源开关、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。

5.2 其他要求

送检时要携带使用说明书，后续检定时要携带上次的检定证书。

6 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。

6.1 检定条件

6.1.1 检定用设备

6.1.1.1 频率稳定度参考频标

输出频率为 5MHz、10MHz，相同取样时间的频率稳定度应优于被检铯频标频率稳定度 3 倍。

6.1.1.2 频率准确度参考频标

输出频率为 5MHz、10MHz，可选用铯频标或氢频标，其频率准确度已校准到比被检铯频标高一个量级。

6.1.1.3 相位噪声参考频标

输出频率为 5MHz、10MHz，相位噪声应比被检铯频标相应傅立叶频率点的相位噪声小 10dB，有电调输入端口。

6.1.1.4 频标比对器

输入频率：5MHz、10MHz。

能够测量和计算频率稳定度，其比对不确定度（用阿仑标准偏差表示）应不大于被检铯频标的频率稳定度的 1/3。

6.1.1.5 相位噪声测量装置

输入频率：5MHz、10MHz。

傅立叶分析频率：1Hz~100kHz，相位噪声本底应比被检铯频标在相应傅立叶频率点的相位噪声小 10dB。

6.1.1.6 频谱分析仪

频率范围覆盖 1MHz~50MHz，动态范围 ≥ 100 dB。

6.1.1.7 时间间隔计数器

时间间隔：1ns~1s；

最大允许误差： ± 1 ns；

触发电平在 (0~5) V 范围内连续可调，并能指示电平值；

有外接频标功能。

6.1.1.8 示波器

上升时间应小于被检脉冲上升时间的 1/3。

6.1.1.9 秒脉冲 (1PPS) 发生器

脉冲幅度： ≥ 2 V (50 Ω)；

脉冲宽度： ≥ 100 ns；

脉冲上升时间： < 5 ns；

有外接频标功能。

6.1.2 检定环境条件

6.1.2.1 环境温度

被检铯频标和参考频标均置于恒温室内，恒温室的温度可在 (20~25) $^{\circ}\text{C}$ 范围内任选一值，检定期间温度最大允许变化 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.2.2 环境湿度

相对湿度 $\leq 80\%$ 。

6.1.2.3 供电电源

交流，电压 220 (1 $\pm 10\%$) V，频率 50 (1 $\pm 2\%$) Hz。

6.1.2.4 周围无影响正常检定的电磁干扰和机械振动。

6.2 检定项目和检定方法

6.2.1 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
外观及工作正常性检查	+	+	+
频率信号幅度	+	+	—
谐波与非谐波失真	+	—	—
频率稳定度	+	+	—
相位噪声	+	+	—
频率准确度	+	+	+

表 3 (续)

项目名称	首次检定	后续检定	使用中检验
频率调整	+	—	—
秒脉冲幅度及宽度	+	+	—
秒脉冲上升时间	+	+	—
时钟同步	+	—	—
注：“+”为必检项，“—”为可不检项。			

6.2.2 检定方法

6.2.2.1 外观及工作正常性检查

(1) 外观检查

应满足 5.1 和 5.2 的要求。

(2) 工作正常性检查

被检铯频标应在说明书规定的预热时间内锁定。锁定后通过显示窗口或计算机软件窗口查看各有关性能参数，显示的数值应在说明书给定的范围内。

6.2.2.2 频率信号幅度的检定

仪器连接如图 2。

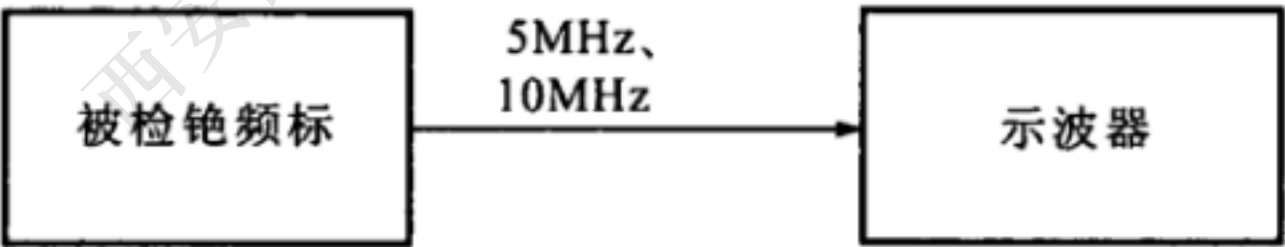


图 2 频率信号幅度的检定

被检铯频标的 5MHz、10MHz 频率信号分别接入示波器，示波器的输入阻抗选为 50Ω，直接测量输入信号的幅度值。

6.2.2.3 谐波与非谐波失真的检定

仪器连接如图 3。被检铯频标的 5MHz、10MHz 信号分别接入频谱分析仪。

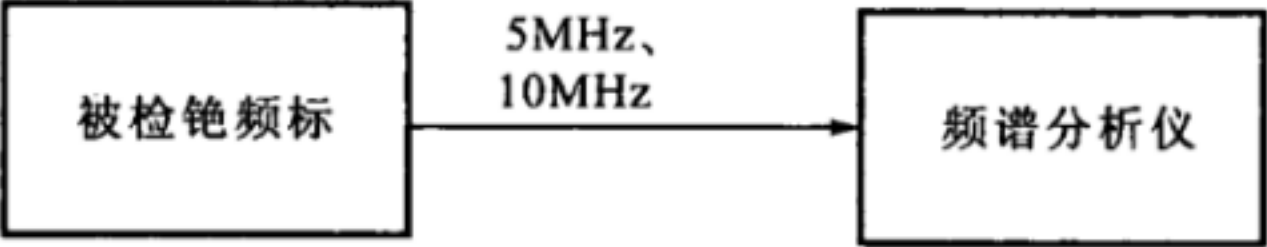


图 3 谐波和非谐波失真的检定

(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 1kHz，合理设置频谱分析仪的起始和终止频率，分别测量基波频率处功率电平 P_1 及 n 次谐波 (一般 n 取 2、3、4、5) 频率处的功率电平 P_n 。

n 次谐波失真 H_n 按公式 $H_n = P_n - P_1$ 计算，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 1kHz, 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 P_1 及偏离载频 10kHz 以外频偏范围内最大的非谐波功率电平 P_N 。非谐波失真 N 按公式 $N = P_N - P_1$ 计算。

6.2.2.4 频率稳定度的检定

利用频标比对器进行测量, 仪器连接如图 4 所示。

f_x 为被检铯频标输出频率, f_r 为参考频标输出频率。

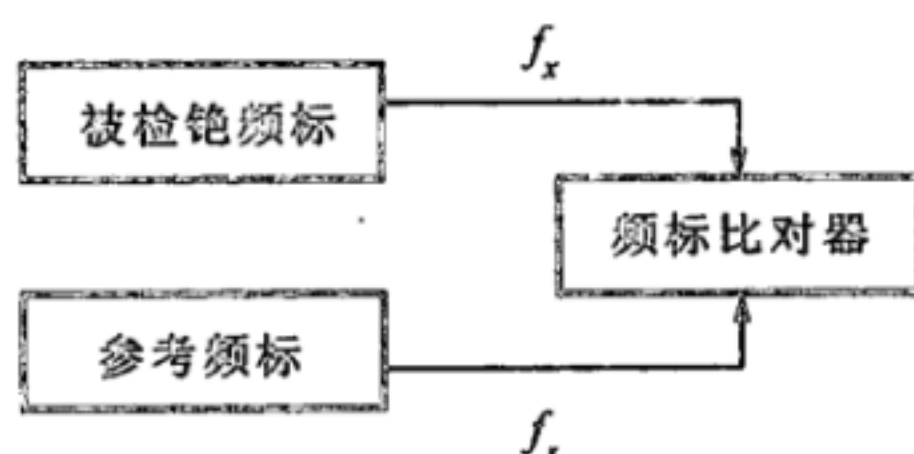


图 4 频率稳定度的检定

取样时间 τ 和取样组数 m 按表 4 选取。

表 4 取样时间和取样组数

τ	m
10ms	≥ 100
100ms	≥ 100
1s	≥ 100
10s	≥ 100
100s	≥ 50
1000s	≥ 15
10000s	≥ 15
1d	≥ 15

频标比对器可采用双混频时差法或频差倍增法, 测量原理见附录 A。

6.2.2.5 相位噪声的检定

仪器连接如图 5。

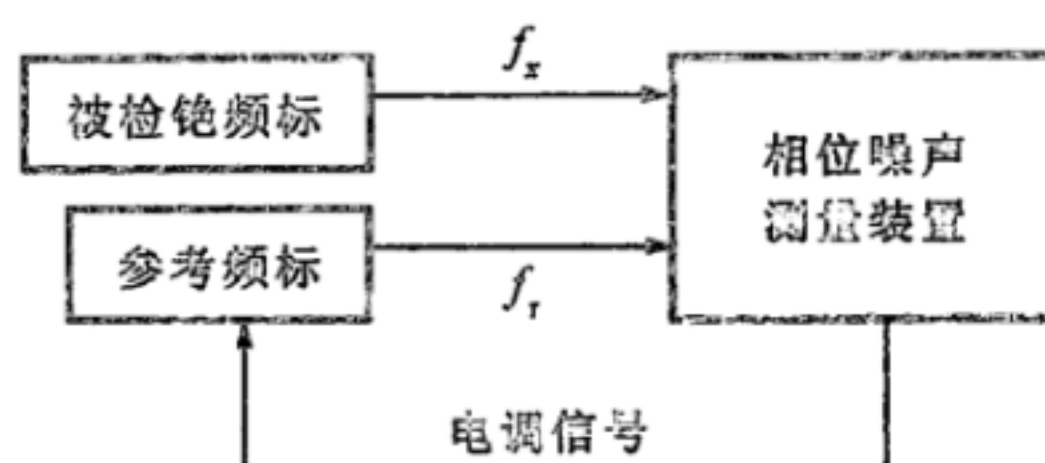


图 5 相位噪声的检定

相位噪声测量装置一般采用正交鉴相法,将被测频标的随机相位噪声转化为与之成正比的随机电压起伏,从而得到被测频标的相位噪声 $\mathcal{L}(f)$ 。

f_x 与 f_r 的标称值要相同,傅立叶分析频率取 1Hz~100kHz。

在检定结果中给出具体的测量结果,或给出相位噪声随傅立叶分析频率的变化曲线。

6.2.2.6 频率准确度的检定

(1) 如果在测量频率稳定度时,频标比对器给出取样时间 $\tau \geq 1d$ 的频率偏差,则取该频率偏差为 $y(\tau)$ 。

(2) 如频标比对器不能给出取样时间 $\tau \geq 1d$ 的频率偏差,则按图 6 所示时差法测量。

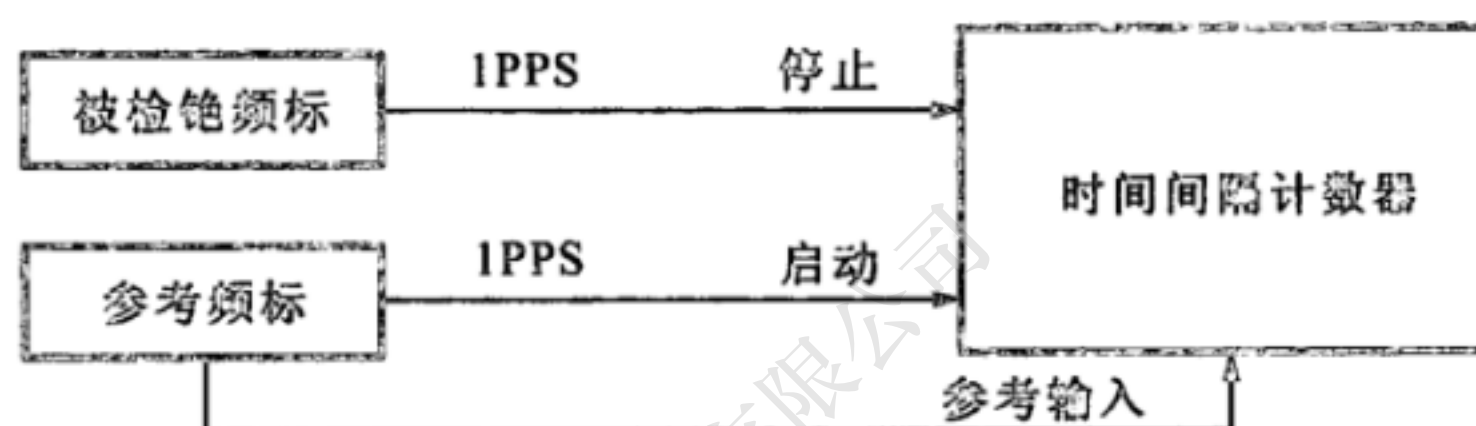


图 6 时差法测量原理

参考频标和被检铯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。时间间隔计数器直接测量两信号的相位时间差,测量结果为 ΔT_1 , 取样时间 $\tau \geq 1d$, 测量结果为 ΔT_2 , 用下式计算频率偏差:

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

(3) 设被检铯频标给定的频率准确度为 A , 实际测得的频率偏差为 $y(\tau)$, 若 $|y(\tau)| \leq A$, 则在检定结果中频率准确度仍按 A 值给出。

若 $|y(\tau)| \geq A$, 设 $y(\tau) = a \times 10^{-n}$, 则 a 以 1 位整数加 1 位小数表示, 频率准确度 A 按下式的结果给出:

$$A = (\text{取整}|a| + 1) \times 10^{-n}$$

例如: 若 $y_1(\tau) = 6.7 \times 10^{-13}$ 或 $y_1(\tau) = -6.3 \times 10^{-13}$, 则取 $A = 7 \times 10^{-13}$

6.2.2.7 频率调整的检定

频率调整的检定,即是通过测量来验证频率调整量的实际值与设定值是否一致。为观测到稳定的频率调整量,要保证选择的取样时间内的频率稳定度比调整量小一个量级。

(1) 调整量设置为 $\pm 1 \times 10^{-13}$

用时差法测量 $y(\tau)$, 取样时间 $\tau \geq 1d$ 。

频率调整前,测出被测频标与参考频标的频率偏差 $y_1(\tau)$, 设置被检铯频标频率调整量为 1×10^{-13} , 测出频率调整后的频率偏差 $y_2(\tau)$ 。

再设置被检铯原子频标频率调整量为 -1×10^{-13} , 测出频率调整后的频率偏差 $y_3(\tau)$ 。

计算出 $y_2(\tau) - y_1(\tau)$ 和 $y_3(\tau) - y_1(\tau)$, 作为频率调整量的实际值, 应与设定的调整量一致。

(2) 调整量设置为 $\pm 1 \times 10^{-9}$

用频标比对器或时差法测量 $y(\tau)$, 取样时间 $\tau \geq 100\text{s}$ 。

调整前, 测出频率偏差 $y_1(\tau)$, 设置被检铯原子频标频率调整量为 1×10^{-9} , 测出频率调整后的频率偏差 $y_2(\tau)$ 。再设置被检铯原子频标频率调整量为 -1×10^{-9} , 测出频率调整后的频率偏差 $y_3(\tau)$ 。

计算出 $y_2(\tau) - y_1(\tau)$ 和 $y_3(\tau) - y_1(\tau)$, 作为频率调整量的实际值, 应与设定的调整量一致。

6.2.2.8 秒脉冲 (1PPS) 幅度及宽度的检定

仪器连接如图 7。被检铯原子钟的秒脉冲信号接入示波器。

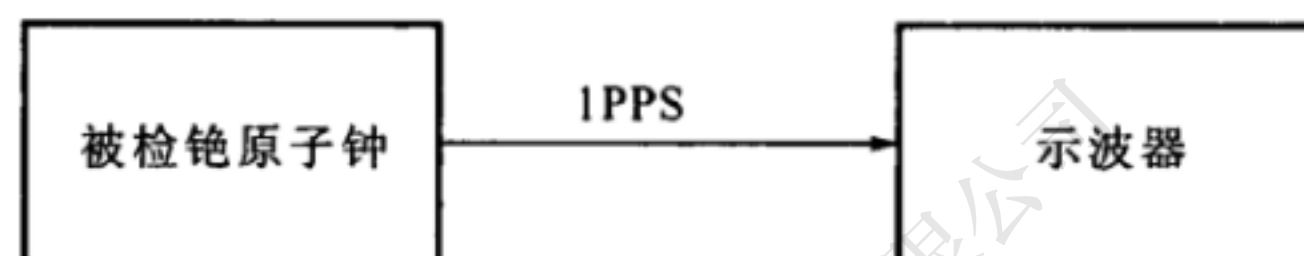


图 7 秒脉冲信号幅度的检定

示波器的输入阻抗选为 50Ω , 调节示波器, 使屏幕上显示稳定的脉冲波形, 直接测量输入秒脉冲信号的幅度与宽度。

6.2.2.9 秒脉冲 (1PPS) 上升时间的检定

仪器连接如图 7 所示。被检铯原子钟的秒脉冲接入示波器。调节示波器, 使屏幕上显示稳定的脉冲波形, 测出秒脉冲幅度从 10% 上升到 90% 所对应的时间间隔即为秒脉冲上升时间。

6.2.2.10 时钟同步功能的检定

(1) 自动同步

仪器连接如图 8 所示。

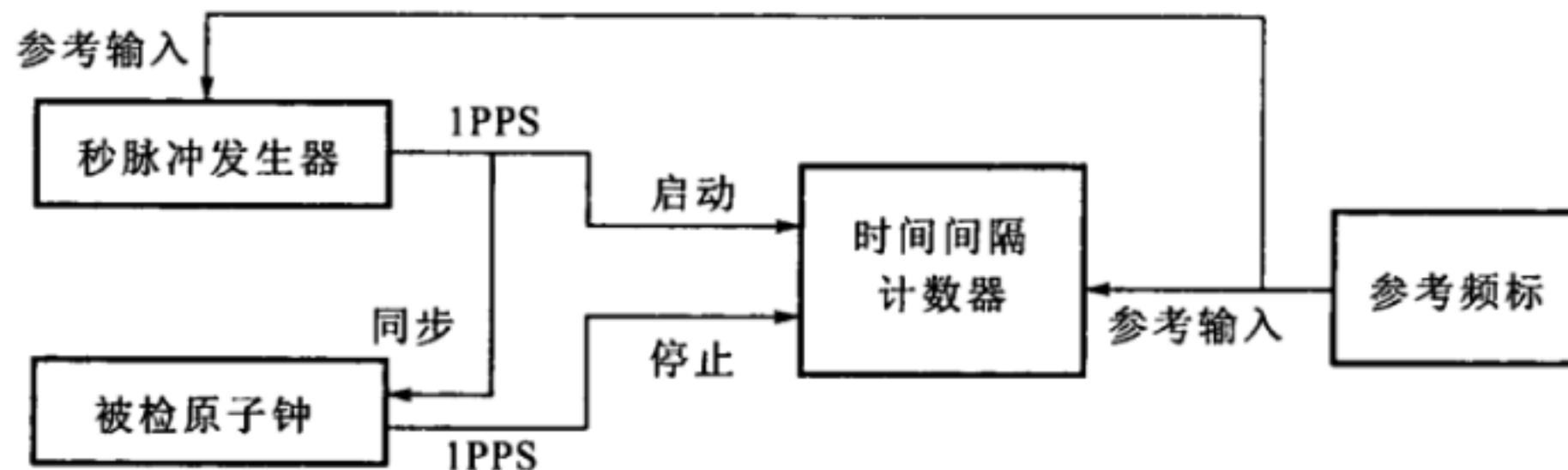


图 8 自动同步的检定

参考秒脉冲发生器输出的秒脉冲加到时间间隔计数器的启动端, 被检铯原子钟输出的秒脉冲加到时间间隔计数器的停止端, 两连接电缆长度应相同, “同步”连接电缆也应尽量短。设置时间间隔计数器的触发电平分别为两脉冲幅度的 $1/2$, 并设为前沿触发。

同步前测量启动、停止两个秒脉冲的时差 ΔT_1 , 同步后再测量这两个秒脉冲的时差

ΔT_2 , ΔT_2 即为实测的同步误差。

(2) 手动同步

手动同步是指人工调整被检铯原子钟输出秒脉冲的相位, 使其与参考秒脉冲的时差减小到相移的分辨力之内。

仪器连接如图 9。

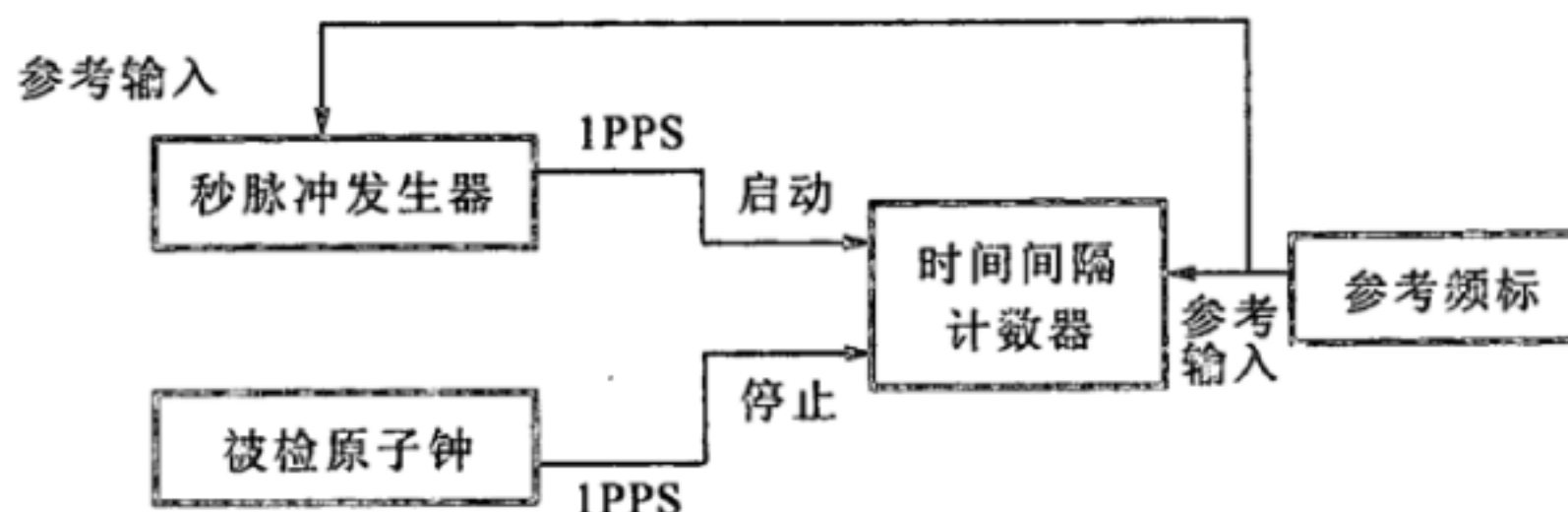


图 9 手动同步的检定

参考秒脉冲发生器输出的 1PPS 信号加到时间间隔计数器的启动端, 被检原子钟输出的 1PPS 信号加到时间间隔计数器的停止端, 两连接电缆长度应相同, 设置时间间隔计数器的触发电平分别为两脉冲幅度的 1/2, 并设为前沿触发。

调整前, 测量两秒脉冲的时差 ΔT_1 。移动被检原子钟秒脉冲的相位 $+0.5\text{s}$, 测量时差为 ΔT_2 , 计算相移的实际值: $S_1 = \Delta T_2 - \Delta T_1$

移动被检原子钟秒脉冲的相位 -0.5s , 测量时差为 ΔT_3 , 计算相移的实际值:

$$S_2 = \Delta T_3 - \Delta T_2$$

移动被检原子钟一个分辨力值, 测量时差为 ΔT_4 , 计算相移的分辨力:

$$R = \Delta T_4 - \Delta T_3$$

S_1 、 S_2 及 R 值应与设定值一致。

6.3 检定结果的处理

按本检定规程要求检定合格的铯频标和铯原子钟, 出具检定证书; 检定不合格的, 出具检定结果通知书, 并注明不合格项目。

6.4 检定周期

铯频标 (或铯原子钟) 的检定周期一般不超过 1 年。

附录 A

两种频标比对器原理

A.1 双混频时差法频标比对器

基本原理如图 A.1 所示。

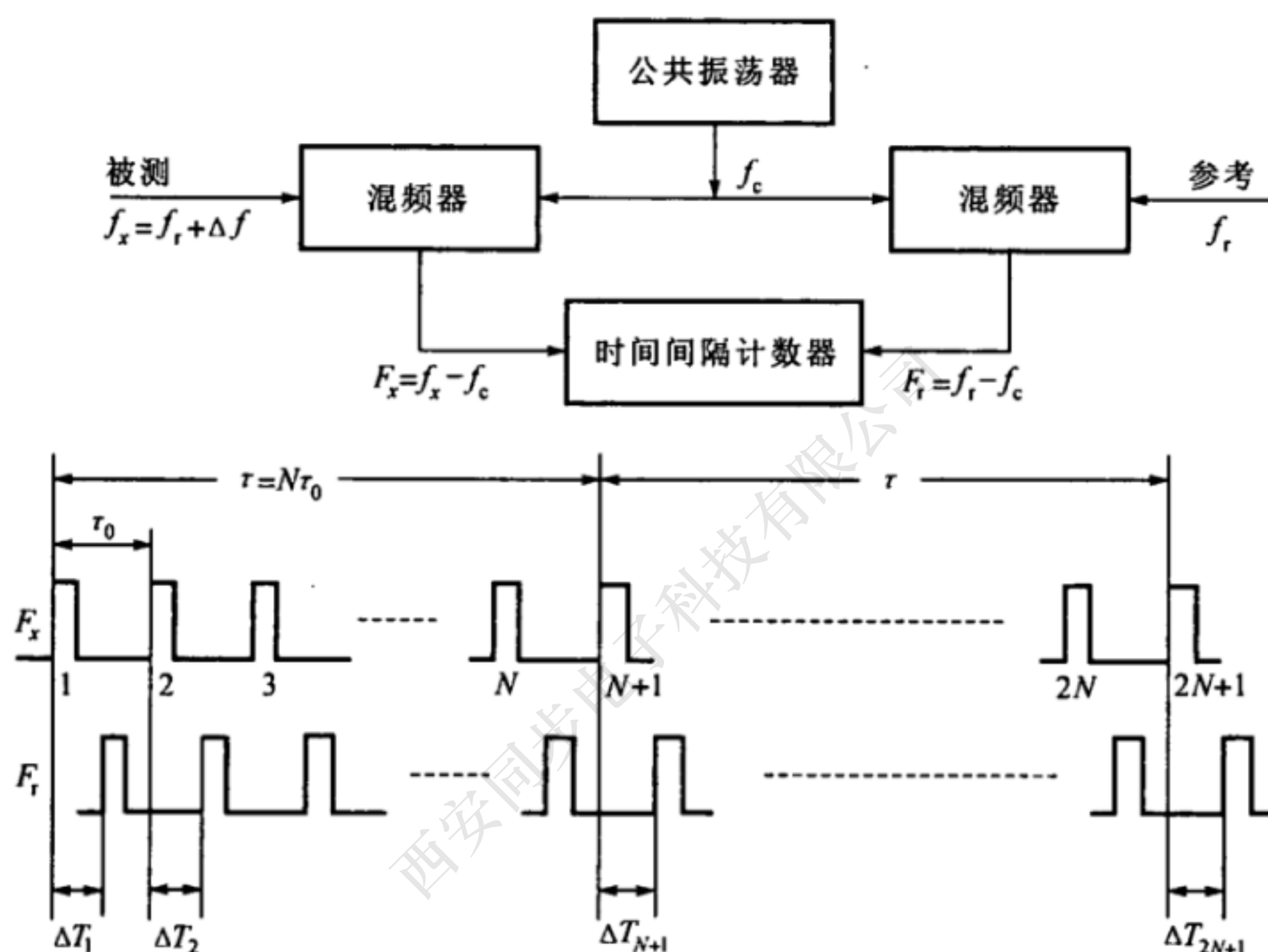


图 A.1 双混频时差法频标比对器原理

输入到频标比对器的被测频率标准与参考频率标准的频率标称值应相同，设为 f_0 ， $f_0 = 5\text{MHz}$ 或 $f_0 = 10\text{MHz}$ 。

比对器内置的公共振荡器输出信号与两频率标准的输出信号进行混频，产生标称值相同的两个低频信号，内置的时间间隔计数器测量两个低频信号的相位差（时差）。利用时差在所需取样时间前后的变化量，计算得到两频率标准在所需取样时间内的相对平均频率偏差。

设低频信号的频率标称值为 F_0 ，由最小取样时间决定。在本规程中取 $F_0 = \frac{1}{10\text{ms}} = 100\text{Hz}$ ，周期以 τ_0 表示。

时间间隔计数器连续测量两个低频信号的时差 ΔT ，每隔 τ_0 测量一次，测得的 ΔT 值按序存储。

设 $\tau = N\tau_0$ ， $N = 1, 2, 3, \dots$ ，为正整数。

按表 4 规定除 $\tau = 1\text{d}$ 外， N 值按 10 倍程选取。如欲在检定结果中给出 $\lg\sigma_y(\tau) \sim \lg\tau$ 的变化曲线， τ 应多取一些值，此时 N 值可按 2、5、10 倍程选取。

由图中可得两频标的相对平均频率偏差：

$$\begin{aligned}
 y_1(\tau) &= \frac{f_x - f_r}{f_0} = \frac{F_x - F_r}{f_0} = \frac{F_0}{f_0} \times \frac{F_x - F_r}{F_0} = \frac{F_0}{f_0} \times \frac{\Delta T_{N+1} - \Delta T_1}{\tau} \\
 y_2(\tau) &= \frac{F_0}{f_0} \times \frac{\Delta T_{2N+1} - \Delta T_{N+1}}{\tau} \\
 &\vdots \\
 y_j(\tau) &= \frac{F_0}{f_0} \times \frac{\Delta T_{jN+1} - \Delta T_{(j-1)N+1}}{\tau}
 \end{aligned}$$

由此得 $y(\tau)$ 的阿伦标准偏差

$$\sigma_y(\tau) = \frac{F_0}{f_0 \tau} \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{j=1}^m (\Delta T_{(j+1)N+1} - 2\Delta T_{jN+1} + \Delta T_{(j-1)N+1})^2} \quad (\text{A. 1})$$

A.2 频差倍增法频标比对器

频差倍增器法一般用于测量 $\tau \leq 100\text{s}$ 的频率稳定度。基本原理如图 A.2 所示。

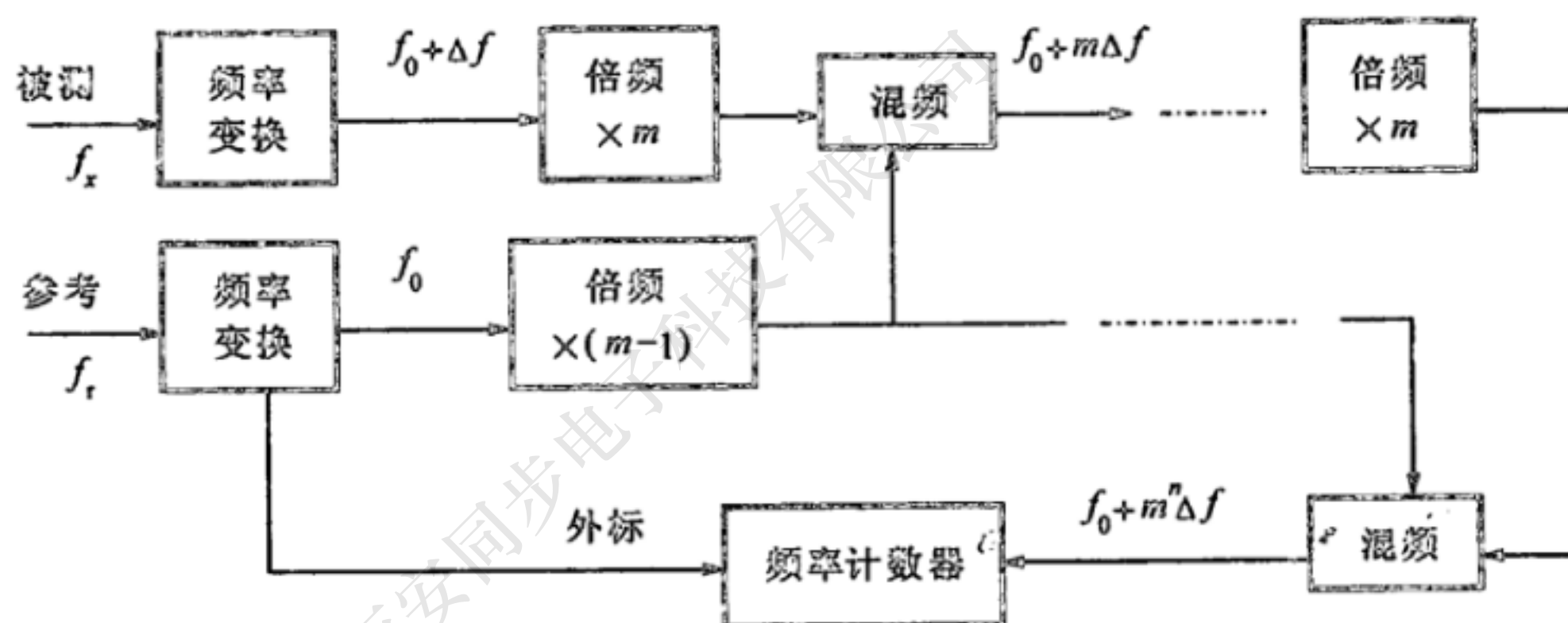


图 A.2 频差倍增法频标比对器原理

输入到比对器的两频标的频率分别被变换成标称值相同的频率，设标称值为 f_0 ，然后进行频差倍增，倍增前的差频为 Δf 。

第一级混频器的输出频率为 $F_1 = f_0 + m\Delta f$

第二级混频频出为 $F_2 = f_0 + m^2\Delta f$

\vdots

\vdots

假定共有 n 级，则最后一级混频器的输出即输入到频率计的频率为

$$F_n = f_0 + m^n \Delta f$$

取样时间由频率计数器测量时的闸门时间给定，通常为 10ms、100ms、1s、10s、100s。

按下式计算频率稳定度：

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{f_0 m^n} \sqrt{\frac{1}{2m} \sum_{j=1}^m (F_{n(j+1)} - F_{nj})^2} \quad (\text{A. 2})$$

附录 B

检定证书（内页）格式

1. 频率信号幅度

频率 (MHz)	幅度 (V)
5	
10	

2. 谐波与非谐波失真

频率 (MHz)	谐波 (dBc)	非谐波 (dBc)
5		
10		

3. 频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$

τ	$\sigma_y(\tau)$
10ms	
100ms	
1s	
10s	
100s	
1000s	
10000s	
1d	

4. 相位噪声 $\mathcal{L}(f)$

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

5. 频率准确度 A $A =$

6. 频率调整

设定值	实际值
1×10^{-13}	
-1×10^{-13}	
1×10^{-9}	
-1×10^{-9}	

7. 秒脉冲幅度与宽度

幅度 $U =$ 宽度 $t_w =$

8. 秒脉冲上升时间

 $t_r =$

9. 时钟同步

(1) 自动同步误差

 $\Delta T =$

(2) 手动同步

相移设定值	相移实际值
0.5s	
-0.5s	
50ns*	

* 按说明书给定的分辨力设定

附录 C

检定结果通知书（内页）格式

1. 频率信号幅度

频率 (MHz)	幅度 (V)
5	
10	

2. 谐波与非谐波失真

频率 (MHz)	谐波 (dBc)	非谐波 (dBc)
5		
10		

3. 频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$

τ	$\sigma_y(\tau)$
10ms	
100ms	
1s	
10s	
100s	
1000s	
10000s	
1d	

4. 相位噪声 $\mathcal{L}(f)$

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

5. 频率准确度 A $A =$

6. 频率调整

设定值	实际值
1×10^{-13}	
-1×10^{-13}	
1×10^{-9}	
-1×10^{-9}	

7. 秒脉冲幅度与宽度

幅度 $U =$ 宽度 $t_w =$

8. 秒脉冲上升时间

 $t_r =$

9. 时钟同步

(1) 自动同步误差

 $\Delta T =$

(2) 手动同步

相移设定值	相移实际值
0.5s	
-0.5s	
50ns*	

* 按说明书给定的分辨力设定

不合格项目:

西安同步电子科技有限公司

中华人民共和国
国家计量检定规程

铯原子频率标准

JJG 492—2009

国家质量监督检验检疫总局发布

*

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

880 mm × 1230 mm 16 开本 印张 1.25 字数 22 千字

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—2 000

统一书号 155026—2415 定价: 26.00 元