



# 中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

## 冷原子微波钟性能表征及测量方法

Performance characterization and measurement methods of cold atom microwave clocks

(征求意见稿)

(本草案完成时间：2026年5月7日)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

前 言 .....	II
引 言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 冷原子微波钟概述 .....	3
4.1 基本原理 .....	3
4.2 分类 .....	3
4.3 系统组成 .....	3
4.4 功能 .....	4
4.5 性能表征参数 .....	5
5 基准钟/次级基准钟性能表征 .....	5
5.1 性能表征参数 .....	5
5.2 测量环境 .....	6
5.3 参测设备 .....	6
5.4 测量方法 .....	6
5.5 测试报告 .....	9
6 基准钟/次级基准钟不确定度评价方法 .....	10
6.1 概述 .....	10
6.2 与秒长国家计量基准进行频率比对 .....	10
6.3 与国际基准钟组进行频率比对 .....	11
7 冷原子微波守时钟性能表征 .....	13
7.1 性能表征参数 .....	13
7.2 测量环境 .....	13
7.3 参测设备 .....	13
7.4 测量方法 .....	14
7.5 测试报告 .....	20
附 录 A （资料性） 秒定义次级表示的频率推荐值 .....	21
附 录 B （规范性） 被测基准钟的 A 类相对频率不确定度计算方法 .....	22

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件全国量子技术标准化技术委员会（SAC/TC 578）提出并归口。

本文件起草单位：中国计量科学研究院、中国科学院国家授时中心、中国科学院上海光学精密机械研究所、北京无线电计量测试研究所、成都天奥电子股份有限公司、济南量子技术研究院、中国科学技术大学、合肥国家实验室、广电计量检测集团股份有限公司。

本文件主要起草人：郑发松、房芳、刘昆、陈伟亮、王心亮、吕德胜、阮军、王秀梅、任伟、王新文、王亮、张华青、戴汉宁、张志强、王超凡、赵可沧、陈法喜、李立波、高帅和。

## 引 言

本文件所提到的冷原子微波钟包括两类，一类是作为基准钟/次级基准钟使用的冷原子微波钟，复现秒定义（ $^{133}\text{Cs}$ ）/次级定义（ $^{87}\text{Rb}$ ）的钟跃迁频率，给出参考频率的相对频率偏差和测量相对频率不确定度；另外一类是作为守时钟使用的冷原子微波钟，直接输出标准频率信号或秒脉冲信号。

本文件所提到的作为基准钟/次级基准钟使用的冷原子微波钟简称为基准钟/次级基准钟，作为守时钟使用的冷原子微波钟简称为冷原子微波守时钟。基准钟/次级基准钟和冷原子微波守时钟性能表征及评价测试方法可参考本文件。

# 冷原子微波钟性能表征及测量方法

## 1 范围

本文件界定了冷原子微波钟的分类和功能，描述了表征冷原子微波钟性能的重要参数及其评价测量方法。

本文件适用于冷原子微波钟技术研究、产品研制和评价测试考核过程中的性能评价。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 39724-2020 铯原子钟技术要求及测试方法

GB/T 43785-2024 光钟性能表征及测量方法

JJF 1180-2025 时间频率计量名词术语及定义

JJF 1958-2021 铯原子频率标准校准规范

JJG 721-2010 相位噪声测量系统

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**冷原子微波钟** cold atomic microwave clock

**冷原子微波频标** cold atomic microwave frequency standard

利用激光冷却与囚禁等技术将原子（离子）冷却至微开尔文量级的极低温，并利用频率在微波波段的原子（离子）能级跃迁作为稳定的频率参考而建立的原子钟，也被称为冷原子微波频率标准，简称冷原子微波频标。

### 3.2

**测量不确定度** measurement uncertainty; uncertainty of measurement

**不确定度** uncertainty

利用可获得的信息，表征赋予被测量量值分散性的非负参数。

[来源：GB/T 43785-2024，3.2]

### 3.3

**频率稳定度** frequency stability

描述频率标准输出频率随机起伏程度的量。

注：一般在时域用阿伦标准偏差表征，在频域用单边带相位噪声表征。

[来源：JJF 1180-2025，4.32]

### 3.4

**阿伦标准偏差** Allan deviation

频率稳定度在时域的数学表征。

注：对于 $M$ 个频率测量数据，阿伦标准偏差按公式（1）计算：

$$\sigma_y(\tau) = \left[ \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

$\sigma_y(\tau)$  ——阿伦标准偏差；

$\tau$  ——取样时间；

$y_i$  ——相对频率偏差；

$M$  ——取样个数。

[来源：JJF 1180-2025, 4.35]

### 3.5

#### 频率偏差 frequency offset

频率测量值与频率标称值之差。

注：频率偏差按公式（2）计算：

$$\Delta f = f_x - f_0 \dots \dots \dots (2)$$

式中：

$\Delta f$  ——频率偏差；

$f_0$  ——频率标称值；

$f_x$  ——频率测量值。

[来源：JJF 1180-2025, 4.25]

### 3.6

#### 相对频率偏差 relative frequency offset

频率偏差与频率标称值的比值。

注：相对频率偏差简称频差，按公式（3）计：

$$y = \frac{\Delta f}{f_0} \dots \dots \dots (3)$$

式中：

$y$  ——相对频率偏差；

$\Delta f$  ——频率偏差；

$f_0$  ——频率标称值。

[来源：JJF 1180-2025, 4.26]

### 3.7

#### 相位噪声 phase noise

频率稳定度的频域表征。定义为单边带偏离信号载频处单位带宽（取 1 Hz）内调相边带功率与载波功率之比。单位为dBc/Hz。偏离载频的偏离值称为傅立叶频率。

[来源：JJG 721-2010, 2.1]

### 3.8

#### 国际原子时 international atomic time; TAI

以原子秒为单位，从1958年世界时1月1日0时开始累积的时标。国际计量局（BIPM）利用分布在世界各地连续工作的几百台原子钟读数加权计算得到自由原子时，再利用秒定义复现装置进行校准，最终获得的高度稳定、高度准确的时间。

[来源：JJF 1180-2025, 3.11]

### 3.9

**协调世界时** coordinated universal time; UTC

国际原子时（TAI）与世界时（UT1）协调后产生的时标，单位为原子秒，在时刻上与UT1靠近，两者之差在 $\pm 0.9$  s之内，与TAI相差整数秒。

[来源：JJF 1180-2025, 3.12]

### 3.10

**喷泉钟** fountain clock

利用激光冷却操控原子，并使原子以喷泉的方式两次通过激励微波腔制成的原子钟。目前主要包括铷喷泉钟和铯喷泉钟。

[来源：JJF 1180-2025, 4.7]

### 3.11

**秒长国家计量基准** national frequency primary standard

又称频率国家计量基准。由国务院计量行政部门组织建立的直接复现秒定义的装置。

注：目前，中国计量科学研究院建立和保持着秒长国家计量基准。

[来源：JJF 1180-2025, 4.8]

### 3.12

**频标比对器** frequency comparator

对两台频率标准进行比对的装置，以高分辨力测出频标的相对频率偏差、频率稳定度等指标，一般采用频差倍增法或双混频时差法。

[来源：JJF 1180-2025, 4.52]

## 4 冷原子微波钟概述

### 4.1 基本原理

**冷原子微波钟工作原理**：具备良好短期频率稳定度的本地振荡器的输出频率信号通过频率综合器上转换到钟跃迁频率，激发量子参考体系（冷原子/离子稳定的微波波段能级跃迁）中的量子跃迁，通过探测系统测量跃迁几率，计算本地振荡器相对于量子参考频率的相对频率偏差，锁定激励微波源或本地振荡器的频率，复现秒定义/次级定义，输出标准频率信号或秒脉冲信号。冷原子微波钟一个运行周期包括冷原子制备、钟跃迁激励、跃迁几率测量、频率误差计算、伺服锁定控制，依照时序控制循环运行。

注：冷原子一般是指利用磁场和激光的散射力组合而成的一种势阱（磁光阱）或漫反射光场或离子阱等对热原子/离子进行冷却与俘获而获得的，冷原子具有热运动速度低、易于操控等特点。

### 4.2 分类

冷原子微波钟按照使用功能分类，分为基准钟/次级基准钟和冷原子微波守时钟两大类。基准钟/次级基准钟直接输出复现秒定义（ $^{133}\text{Cs}$ ）/次级定义（ $^{87}\text{Rb}$ ）的钟跃迁频率，并评定其相对频率不确定度；冷原子微波守时钟输出5 MHz / 10 MHz / 100 MHz的标准频率信号或秒脉冲信号。按照结构设计，冷原子微波钟包括喷泉钟、积分球钟、小型下落式冷原子微波钟，以及其他利用冷原子/离子微波频段跃迁作为量子参考频率的原子钟等。

### 4.3 系统组成

#### 4.3.1 基准钟/次级基准钟

基准钟/次级基准钟主要包括激励微波单元、量子参考体系、电控锁定单元等组成部分，如图1所示。

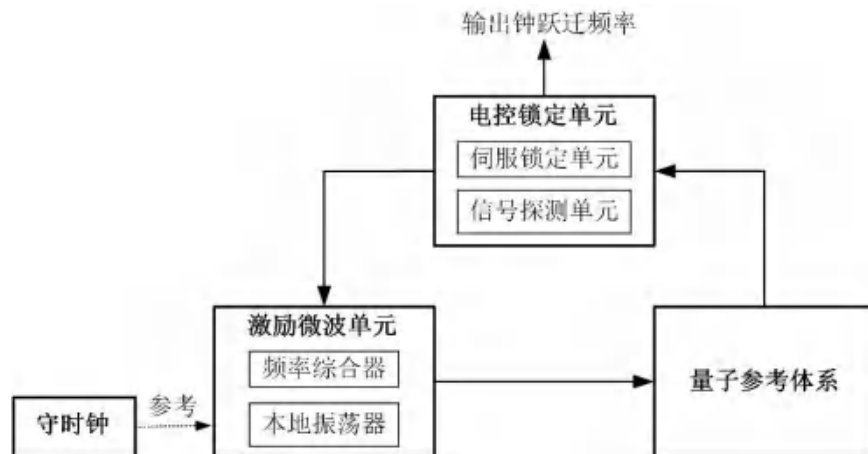


图1 基准钟/次级基准钟的系统组成图

激励微波单元，为探测量子参考跃迁提供频率短期稳定度极高的激励微波信号。基准钟/次级基准钟的激励微波源中的本地振荡器可以采用具有高短期频率稳定度的高稳/超稳晶振、低温蓝宝石振荡器或光生超稳微波源，将其输出频率参考至守时钟；或者直接利用守时钟作为本地振荡器。

注：与基准钟/次级基准钟配合使用的守时钟一般为氢钟。

量子参考体系，利用冷原子/离子稳定的微波波段能级跃迁作为标准频率参考，包括被测原子/离子所在的物理系统及操控-探测原子/离子所需的激光系统。

电控锁定单元是基准钟/次级基准钟的信号探测及数字伺服反馈系统，用于探测量子参考的跃迁几率，计算守时钟频率相对于量子参考频率的相对频率偏差，最终通过计算复现秒定义（ $^{133}\text{Cs}$ ）/次级定义（ $^{87}\text{Rb}$ ）的钟跃迁频率，并给出其相对频率不确定度。

#### 4.3.2 冷原子微波守时钟

冷原子微波守时钟的系统组成和基准钟相似，包括激励微波单元、量子参考体系和电控锁定单元，只是激励微波单元不需要外参考而是直接将误差信号反馈到本地振荡器或频率综合器，调整本地振荡器或频率综合器的频率锁定到钟跃迁频率，最终输出标准的 5 MHz/10 MHz/100 MHz 的频率信号或秒脉冲信号，如图2所示。

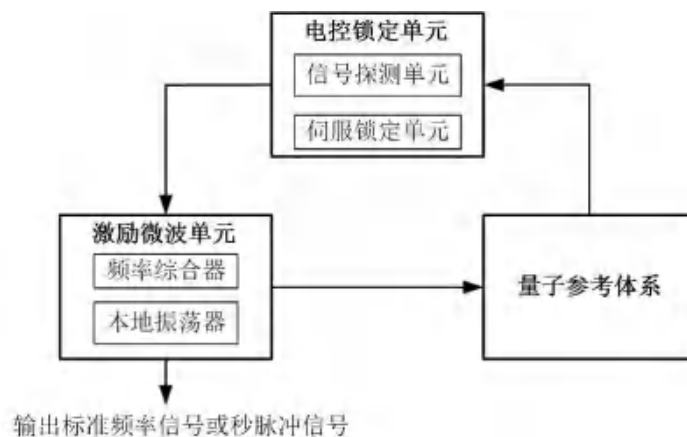


图2 冷原子微波守时钟的系统组成图

#### 4.4 功能

#### 4.4.1 基准钟/次级基准钟

基准钟/次级基准钟输出复现秒定义 ( $^{133}\text{Cs}$ ) /次级定义 ( $^{87}\text{Rb}$ ) 的钟跃迁频率, 一般为喷泉钟。基准钟在运行时需要守时钟作为频率参考, 给出守时钟的相对频率偏差, 并给出其相对频率不确定度。作为基准钟/次级基准钟驾驭原子时标时, 不需要连续运行, 但需要修正各项物理效应引进的频率偏差并评定其频率不确定度。

#### 4.4.2 冷原子微波守时钟

冷原子微波守时钟输出5 MHz、10 MHz或100 MHz的标准频率信号或秒脉冲信号。冷原子微波守时钟主要功能是产生原子时标。因此, 作为冷原子微波守时钟一般要求系统工作的连续性、稳定性和复现性。

### 4.5 性能表征参数

#### 4.5.1 基准钟/次级基准钟

冷原子微波钟作为基准钟/次级基准钟使用, 其性能用相对频率不确定度表示, 包括A类相对频率不确定度、B类相对频率不确定度, 其中A类相对频率不确定度和频率稳定度相关, B类相对频率不确定度通过评定影响其输出频率的各项物理效应获得。对于次级基准钟, 总不确定度还包括频率推荐值相对不确定度(由国际计量局给出)。此外, 还需要运行率指标来衡量在特定时间间隔内基准钟/次级基准钟的运行情况。

#### 4.5.2 冷原子微波守时钟

冷原子微波钟作为守时钟使用, 需要长期输出标准频率信号或秒脉冲信号, 需要对频率稳定度、相对频率偏差、频率复现性、频率漂移率和相位噪声进行表征。

### 5 基准钟/次级基准钟性能表征

#### 5.1 性能表征参数

##### 5.1.1 频率稳定度

基准钟/次级基准钟性能表征中的频率稳定度采用时域上的阿伦标准偏差 $\sigma_y(\tau)$ 来表征。在未说明时, 默认为相对频率稳定度。按照测量方法不同, 表示为不同频率稳定度参数。

- 利用被测基准钟/次级基准钟以守时钟作为参考测量得到的频率稳定度 $\sigma_{y1}(\tau)$ 。
- 利用两台被测基准钟/次级基准钟以同一台守时钟作为参考测量得到的频率稳定度 $\sigma_{y2}(\tau)$ 。

##### 5.1.2 频率不确定度

基准钟/次级基准钟性能表征中的频率不确定度包含A类相对频率不确定度、B类相对频率不确定度和频率推荐值相对不确定度三个参数。

注1: 基准钟/次级基准钟的相对频率不确定度表示见式(4):

$$u^2 = u_A^2 + u_B^2 + u_{\text{rec}}^2 \dots \dots \dots (4)$$

式中:

$u$ 表示基准钟/次级基准钟的相对频率不确定度;

$u_A$ 表示A类相对频率不确定度;

$u_B$ 表示B类相对频率不确定度;

$u_{\text{rec}}$ 表示频率推荐值相对不确定度。

- a) **A类相对频率不确定度**: 通过对基准钟/次级基准钟在特定时间段内输出频率的观测序列进行统计分析(如阿伦标准偏差), 所评定的其相对频率值围绕长期平均值的相对分散性的度量。该分散性主要由量子投影噪声、本地振荡器噪声等随机效应引起, 它表征了基准钟/次级基准钟在相应平均时间内复现秒定义或次级定义的随机不确定度分量。
- b) **B类相对频率不确定度**: 通过对基准钟/次级基准钟已知的系统频移及其修正量进行非统计分析(如校准证书、既往实验数据、物理模型等)所评定的不确定度分量。它表征了由于无法完全消除或精确修正各类系统效应(如冷原子碰撞频移、二阶塞曼频移、黑体辐射频移、引力红移等), 导致基准钟/次级基准钟在复现秒定义或次级定义时, 其给出的守时钟的相对频率偏差仍可能存在的相对不确定度。
- c) **频率推荐值相对不确定度**: 仅次级基准钟考虑此项, 基准钟无需考虑。

注2: 国际计量局推荐 $^{87}\text{Rb}$ 原子钟跃迁频率值( $^{87}\text{Rb}$ )= $6\,834\,682\,610.904\,312\,6\text{ Hz}$ , 其相对频率不确定度为 $u_{\text{rec}}=3.4\times 10^{-16}$ 。

### 5.1.3 运行率

运行率是指在要求的测量时间内, 被测基准钟/次级基准钟能够正常给出复现秒定义( $^{133}\text{Cs}$ )/次级定义( $^{87}\text{Rb}$ )的钟跃迁频率的工作时长与测量时间总时长的比值, 一般用百分比表示。通常用月运行率、年运行率等来具体表征。

## 5.2 测量环境

基准钟/次级基准钟的测量环境要求如下:

- 环境温度: 根据需要选择温度工作点, 建议 $23\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内任选一点, 温度最大允许变化 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- 相对湿度:  $30\% \sim 80\%$ ;
- 其他: 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

## 5.3 参测设备

守时钟作为被测基准钟/次级基准钟的频率参考, 参数要求如下:

- 输出频率:  $5\text{ MHz}$ 、 $10\text{ MHz}$ 或 $100\text{ MHz}$ 。

## 5.4 测量方法

### 5.4.1 频率稳定度

#### 5.4.1.1 基准钟/次级基准钟以守时钟作参考测量得到的频率稳定度

采用守时钟输出的标准频率信号, 为被测基准钟/次级基准钟的激励微波单元提供参考, 计算守时钟的相对频率偏差, 最后由相对频率偏差得到频率稳定度。取样时间和取样组数按表1选取。

表1 取样时间和取样组数

取样时间 $\tau$	取样组数 $m$
10 s	$\geq 100$
100 s	$\geq 50$
1000 s	$\geq 15$
10000 s	$\geq 15$
1 d	$\geq 15$

> 1 d	≥15
-------	-----

按以下方法进行测量。

- a) 将守时钟输出的标准频率信号作为外部参考信号接入被测基准钟/次级基准钟，使其正常闭环锁定，并在单一条件下连续运行。
- b) 测量并计算被测基准钟/次级基准钟给出的守时钟的相对频率偏差 $y_{out}$ 。
- c) 将相对频率偏差 $y_{out}$ 按照公式（1）计算阿伦标准偏差 $\sigma_{y1}(\tau)$ 。
- d) 根据 $\sigma_{y1}(\tau)$ 得到频率稳定度曲线，频率稳定度按照 $\sigma_{y1}/\sqrt{\tau}$ 下降。秒稳通过曲线拟合与外推得到。当 $\tau=1$  d对应的频率稳定度 $\sigma_{y1}(\tau)$ 为被测基准钟/次级基准钟的天频率稳定度（天稳），此时取样时间 $\geq 15$  d。

注：天稳包含了守时钟的频率稳定度。

#### 5.4.1.2 两台基准钟/次级基准钟之间的频率比对

两台被测基准钟/次级基准钟均以同一台守时钟作为外部频率参考，通过虚拟拍频的方法测量两台被测基准钟/次级基准钟输出复现秒定义（ $^{133}\text{Cs}$ ）/次级定义（ $^{87}\text{Rb}$ ）的钟跃迁频率之间的相对频率偏差，并由此计算得到的频率稳定度 $\sigma_{y2}(\tau)$ 。测量方法如图3所示。取样时间和取样组数按表1选取。

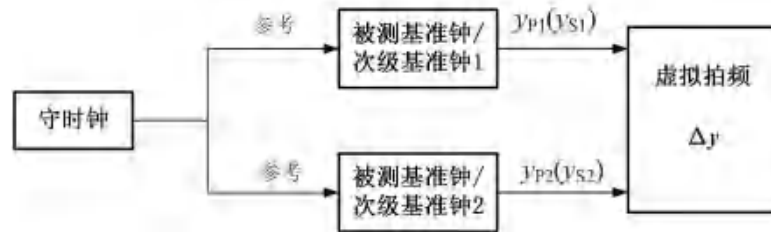


图3 共用守时钟频率参考的两台基准钟/次级基准钟比对示意图

按以下方法进行测量。

- a) 将守时钟输出的标准频率信号分成两路，分别作为两台被测基准钟/次级基准钟的外部参考信号输入。
- b) 两台被测基准钟/次级基准钟正常闭环锁定状态，连续运行在单一工作条件，并保持同步运行。
- c) 测量并计算每台被测基准钟/次级基准钟给出的守时钟的相对频率偏差 $y_{P1}(y_{S1})$ 和  $y_{P2}(y_{S2})$ ，其中基准钟时为 $y_P$ ，次级基准钟时为 $y_S$ 。对同一时间段内的两路相对频率偏差同步比对并作差，得到虚拟拍频 $\Delta y = y_{P1}(y_{S1}) - y_{P2}(y_{S2})$ 。
- d) 利用虚拟拍频 $\Delta y$ 按照公式（1）计算阿伦标准偏差 $\sigma_{12}(\tau)$ 。

当其中一台被测基准钟/次级基准钟为频率稳定度已知的参考时，则被测基准钟/次级基准钟的频率稳定度表示见式（5）：

$$\sigma_{y2}(\tau) = \sqrt{\sigma_{12}^2(\tau) - \sigma_{\text{REF}}^2(\tau)} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$\sigma_{12}(\tau)$  ——通过虚拟拍频 $\Delta y$ 计算得到的阿伦标准偏差；

$\sigma_{\text{REF}}(\tau)$  ——参考基准钟/次级基准钟的频率稳定度；

$\sigma_{y2}(\tau)$  ——被测基准钟/次级基准钟的频率稳定度。

当两台被测基准钟/次级基准钟性能相近，则单台被测基准钟/次级基准钟的频率稳定度表示见式（6）：

$$\sigma_{y2}(\tau) = \sigma_{12}(\tau) / \sqrt{2} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$\sigma_{12}(\tau)$ ——通过虚拟拍频 $\Delta y$ 代入公式（1）计算得到的阿伦标准偏差；

$\sigma_{y2}(\tau)$ ——单台被测基准钟/次级基准钟的频率稳定度。

#### 5.4.2 频率不确定度

##### 5.4.2.1 A类频率不确定度

为了校正与原子密度相关的冷原子碰撞频移对测量频率的影响，基准钟/次级基准钟的A类相对频率不确定度一般用冷原子云零密度时的相对频率稳定度来表征。然而，对于次级基准钟，由于 $^{87}\text{Rb}$ 原子的碰撞频移很小，其A类相对频率不确定度可以直接用5.4.1中的频率稳定度来表征。

被测基准钟按以下方法进行测量。

##### a) 测量分为两种方法：

第一种方法：被测基准钟以守时钟为参考，在高密度原子云和低密度原子云模式下交替闭环运行 $n$ 天，记录高密度时原子数 $N_H$ ，高密度时守时钟的相对频率偏差 $y_H$ ，低密度时原子数 $N_L$ 以及低密度时守时钟的相对频率偏差 $y_L$ 。

第二种方法：被测基准钟的冷原子碰撞频移系数 $k$ 已知且长时间稳定，此时被测基准钟以守时钟为参考，可在单一原子云密度下连续运行 $n$ 天，记录单一密度时原子数 $N_{p-s}$ 及守时钟的相对频率偏差 $y_{p-s}$ 。

##### b) 不确定度计算：

对于第一种测量方法，由原子数 $N_H$ 和 $N_L$ ，以及相对频率偏差 $y_H$ 和 $y_L$ ，参照附录B.1计算A类相对频率不确定度 $u_A$ 。

对于第二种测量方法，由原子数 $N_{p-s}$ 、相对频率偏差 $y_{p-s}$ 和系数 $k$ ，参照附录B.2计算A类相对频率不确定度 $u_A$ 。

被测次级基准钟按以下方法进行测量。

##### a) 在单一原子云密度下连续运行 $n$ 天，记录单一密度时原子数 $N_{s-s}$ 及守时钟的相对频率偏差 $y_{s-s}$ 。

##### b) 将 $n$ 天测得的守时钟的相对频率偏差 $y_{s-s}$ 序列代入阿伦标准偏差公式（1），得到频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$ 曲线，获得天稳 $\sigma_{1d}$ 。 $\sigma_{1d}/\sqrt{n}$ 就表示为被测次级基准钟的A类相对频率不确定度 $u_A$ 。

注：被测基准钟/次级基准钟测量得到的高密度、低密度或单一密度时守时钟的相对频率偏差一般是指未修正系统频移项的相对频率偏差。

##### 5.4.2.2 B类频率不确定度

由于各种物理效应（如二阶塞曼频移、黑体辐射频移、碰撞频移、引力红移等）的影响，基准钟/次级基准钟的原子系统不可能处于理想的、未受干扰的状态。其实际观测到的钟跃迁频率与未受干扰的理想定义值之间存在一个偏差，这个偏差被称为系统频移。通过实验测量和理论计算对这些系统频移进行定量评估并予以修正。然而，对每一个频移分量的评估都存在局限性（如测量噪声、理论模型近似、环境参数监测的不确定度等），导致系统频移无法被完全确知与修正。这种对系统频移评定结果的不确定度，被称为系统频移不确定度，即B类相对频率不确定度 $u_B$ 。

注：系统频移一般用相对频率偏移来表征，是用频率偏移量除以原子跃迁频率标称值得到的。

按以下方法进行测量。

##### a) 造成被测基准钟/次级基准钟系统频移的因素有很多，如外界热环境造成的黑体辐射频移、外界磁场造成的塞曼频移、冷原子之间碰撞造成的原子碰撞频移、海拔高度引起的引力红移等。各种系统频移的测量与评定方法为：一般是先根据物理模型确定频移量与相关物理参数

- (如温度、磁场、原子数等)的函数关系及敏感度系数,然后监测相关物理参数,利用模型计算得到各系统频移量及其不确定度。系统频移的总不确定度采用合成标准不确定度表征。
- b) 系统频移量基于物理模型计算,模型建立频移量与可监测物理参数之间的定量关联。将各参数的最佳估计值(如多次测量的算术平均值)代入模型,计算得到系统频移量的最佳估计值。系统频移的合成标准不确定度依据不确定度传播律评定,由各输入参数的测量不确定度、模型系数的不确定度共同合成得到。
- c) 得到各项频移后,需要对被测基准钟/次级基准钟测量得到的未修正系统频移的守时钟的相对频率偏差 $y_{PS}$ 进行修正,表示见式(7):

$$y_{PS0} = y_{PS} + \sum_i y_i \dots \dots \dots (7)$$

式中:

$y_{PS0}$  ——被测基准钟/次级基准钟给出的经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差(基准钟取 $y_{P0}$ ,次级基准钟取 $y_{S0}$ );

$y_{PS}$  ——被测基准钟/次级基准钟测量得到未修正系统频移的守时钟的相对频率偏差(基准钟取 $y_P$ ,次级基准钟取 $y_S$ );

$y_i$  ——各系统频移分量,主要包括二阶塞曼频移、黑体辐射频移、冷原子碰撞频移、微波腔相位差频移、引力红移、光频移、微波泄漏频移等;其中,冷原子碰撞频移修正方法可参考附录B.1。

完成各系统频移分量的不确定度评定后,对各分项不确定度进行合成。当各分项不确定度相互独立不相关时,B类相对频率不确定度表示见式(8):

$$u_B = \sqrt{\sum_i u_i^2} \dots \dots \dots (8)$$

式中:

$u_B$  ——被测基准钟/次级基准钟的B类相对频率不确定度;

$u_i$  ——各系统频移分量 $y_i$ 对应的相对不确定度。

#### 5.4.3 运行率

按照以下方法进行测量。

- a) 约定被测基准钟/次级基准钟运行率测量的起止时间,总时长为 $T$ 。在这段时间内,被测基准钟/次级基准钟按约定的条件(比如可以约定激光器频率失锁后是否允许人工干预激光器的频率锁定)运行。
- b) 在测量时间结束后,提取被测基准钟/次级基准钟能够正常给出复现秒定义( $^{133}\text{Cs}$ )/次级定义( $^{87}\text{Rb}$ )的钟跃迁频率的时间 $t$ 。
- c) 按照公式(9)计算被测基准钟/次级基准钟的运行率:

$$R = \frac{t}{T} \times 100\% \dots \dots \dots (9)$$

式中:

$R$  ——被测基准钟/次级基准钟的运行率;

$t$  ——被测基准钟/次级基准钟能够正常给出复现秒定义( $^{133}\text{Cs}$ )/次级定义( $^{87}\text{Rb}$ )的钟跃迁频率的时间;

$T$  ——被测基准钟/次级基准钟运行率测量的总时长。

## 5.5 测试报告

测试报告至少应包括：

- 本文件编号；
- 性能测试所依据的方法；
- 测试结果；
- 测试过程中观察到的异常现象；
- 测试日期。

注1：测试报告记录被测基准钟/次级基准钟，包括秒稳( $\tau=1$  s)、十秒稳( $\tau=10$  s)、百秒稳( $\tau=100$  s)、千秒稳( $\tau=1000$  s)、万秒稳( $\tau=10000$  s)、天稳( $\tau=1$  d)等。

注2：测试报告记录被测基准钟/次级基准钟的频率不确定度，包括A类相对频率不确定度及其测量时间、B类相对频率不确定度、测试环境温度、测试地点海拔高度等。

## 6 基准钟/次级基准钟不确定度评价方法

### 6.1 概述

对于基准钟/次级基准钟自评定得到的相对频率不确定度，可以通过与秒长国家计量基准或国际基准钟组进行频率比对进行评价。

### 6.2 与秒长国家计量基准进行频率比对

#### 6.2.1 测量方法

被测基准钟/次级基准钟与秒长国家计量基准进行频率比对的方法如图4所示。被测基准钟/次级基准钟与秒长国家计量基准选用同一参考守时钟，在相同时间段内进行 $M$ 天的同步频率比对，一般 $M \geq 10$ 。

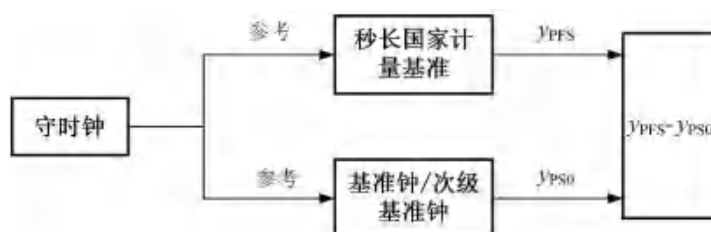


图4 基准钟/次级基准钟与秒长国家计量基准同步比对的原理框图

#### 6.2.2 计算方法

完成 $M$ 天同步比对后，根据测得的被测基准钟原子数及未修正系统频移的守时钟的相对频率偏差，按5.4.2.1和5.4.2.2方法评定，得到被测基准钟的A类相对频率不确定度 $u_{P-A}$ 、B类相对频率不确定度 $u_{P-B}$ ，以及经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差 $y_{P0}$ 。

如果 $M$ 天比对期间，被测基准钟与秒长国家计量基准测量得到的守时钟的相对频率偏差之差 $\Delta y_P$ 满足条件式(10)，则判定被测基准钟输出复现秒定义的钟跃迁频率是在其自评定相对不确定度范围之内：

$$|\Delta y_P| = |y_{P0} - y_{PFS}| \leq 2\sqrt{(u_{P-A})^2 + (u_{P-B})^2 + (u_{P-link/lab})^2 + (u_{PFS-A})^2 + (u_{PFS-B})^2 + (u_{PFS-link/lab})^2} \quad (10)$$

式中：

$\Delta y_P$  ——被测基准钟与秒长国家计量基准给出的守时钟的相对频率偏差之差；

$y_{P0}$  ——被测基准钟给出的经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差；

$y_{PFS}$  ——秒长国家计量基准给出的守时钟的相对频率偏差；

- $u_{P-A}$  ——被测基准钟的A类相对频率不确定度；
- $u_{P-B}$  ——被测基准钟的B类相对频率不确定度；
- $u_{P-link/lab}$  ——被测基准钟的实验室链路相对不确定度；
- $u_{PFS-A}$  ——秒长国家计量基准的A类相对频率不确定度；
- $u_{PFS-B}$  ——秒长国家计量基准的B类相对频率不确定度；
- $u_{PFS-link/lab}$  ——秒长国家计量基准的实验室链路相对不确定度。

同理，完成 $M$ 天同步比对后，根据测得的被测次级基准钟原子数以及未修正系统频移的守时钟的相对频率偏差，按5.4.2.1和5.4.2.2方法评定，得到被测次级基准钟的A类相对频率不确定度 $u_{S-A}$ 、B类相对频率不确定度 $u_{S-B}$ ，以及经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差 $y_{S0}$ 。

如果 $M$ 天比对期间，被测次级基准钟与秒长国家计量基准测量得到的守时钟的相对频率偏差之差 $\Delta y_S$ 满足条件式（11），则判定被测次级基准钟输出复现次级秒定义的钟跃迁频率是在其自评定相对不确定度范围之内：

$$|\Delta y_S| = |y_{S0} - y_{PFS}| \leq 2\sqrt{(u_{S-A})^2 + (u_{S-B})^2 + (u_{S-link/lab})^2 + (u_{PFS-A})^2 + (u_{PFS-B})^2 + (u_{PFS-link/lab})^2 + (u_{rec})^2} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

$\Delta y_S$  ——被测次级基准钟与秒长国家计量基准给出的守时钟的相对频率偏差之差；

$y_{S0}$  ——被测次级基准钟给出的经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差；

$y_{PFS}$  ——秒长国家计量基准给出的守时钟的相对频率偏差；

$u_{S-A}$  ——被测次级基准钟的A类相对频率不确定度；

$u_{S-B}$  ——被测次级基准钟的B类相对频率不确定度；

$u_{S-link/lab}$  ——被测次级基准钟的实验室链路相对不确定度；

$u_{PFS-A}$  ——秒长国家计量基准的A类相对频率不确定度；

$u_{PFS-B}$  ——秒长国家计量基准的B类相对频率不确定度；

$u_{PFS-link/lab}$  ——秒长国家计量基准的实验室链路相对不确定度；

$u_{rec}$  ——被测次级基准钟频率推荐值的相对不确定度。

注：实验室链路相对不确定度主要包括A类相对不确定度和B类相对不确定度两部分。A类相对不确定度包括：1) 参考守时钟信号传输至被测基准钟/次级基准钟时链路相位扰动引入的分量；2) 参考守时钟连续运行，而被测基准钟/次级基准钟可能存在非连续运行情形，此时要考虑被测基准钟/次级基准钟非连续运行带来的非有效运行时间引入的频率测量不确定度。B类相对不确定度是由参考守时钟近端输出与远端（被测基准钟/次级基准钟处）输出之间的频率差异引入。

## 6.3 与国际基准钟组进行频率比对

### 6.3.1 测量方法

被测基准钟/次级基准钟与国际基准钟组进行频率比对的方法如图5所示。被测基准钟/次级基准钟参考至守时钟，按5.4.2.1和5.4.2.2方法评定，被测基准钟给出经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差 $y_{P0-TP}$ （对于次级基准钟为 $y_{S0-TP}$ ）。

通过如下频率偏差传递链实现被测基准钟/次级基准钟与国际基准钟组的比对：守时钟相对于本地协调世界时（UTC( $k$ ））的相对频率偏差 $y_{TP-UTC(k)}$ （通常采用时间间隔计数器测量时差并换算为相对频率偏差）；本地协调世界时UTC( $k$ )相对于协调世界时（UTC）的相对频率偏差 $y_{UTC(k)-UTC}$ （利用国际计量局（BIPM）网站公布的时间偏差序列，每5天一个数据，将时间偏差（单位：ns）换算成相对频率偏差）；UTC相对于国际基准钟组的相对频率偏差 $y_{UTC-TT}$ （由国际计量局（BIPM）网站公布）。

被测基准钟/次级基准钟与国际基准钟组进行M天同步比对，一般M为30或35，与BIPM公布的国际基准钟组报数周期保持一致。

注：测量起始和结束时间应选择修改儒略日（MJD）尾数以数字“4”或“9”的日期，以便与BIPM公布的UTC(k)-UTC数据周期对齐。

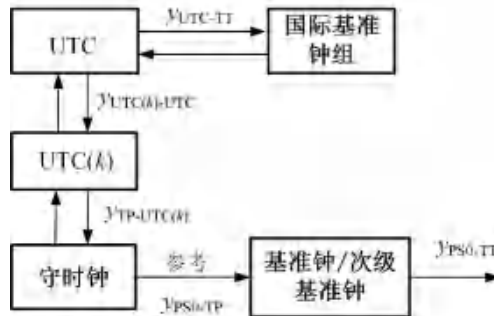


图5 基准钟/次级基准钟与国际基准钟组比对的原理框图

### 6.3.2 计算方法

在获得被测基准钟给出的守时钟的相对频率偏差 $y_{P0-TP}$ （次级基准钟为 $y_{S0-TP}$ ）、守时钟相对于UTC(k)的相对频率偏差 $y_{TP-UTC(k)}$ 、UTC(k)相对于UTC的相对频率偏差 $y_{UTC(k)-UTC}$ ，以及UTC相对于国际基准钟组（TT）的相对频率偏差 $y_{UTC-TT}$ 后，进一步得到被测基准钟/次级基准钟相对于国际基准钟组的相对频率偏差见式（12）：

$$y_{PS-TT} = y_{PS0-TP} + y_{TP-UTC(k)} + y_{UTC(k)-UTC} + y_{UTC-TT} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

- $y_{PS-TT}$  —— 被测基准钟/次级基准钟相对于国际基准钟组的相对频率偏差；
- $y_{PS0-TP}$  —— 被测基准钟/次级基准钟给出的经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差（基准钟取 $y_{P0-TP}$ ，次级基准钟取 $y_{S0-TP}$ ）；
- $y_{TP-UTC(k)}$  —— 守时钟（TP）相对于UTC(k)的相对频率偏差；
- $y_{UTC(k)-UTC}$  —— UTC(k)相对于UTC的相对频率偏差；
- $y_{UTC-TT}$  —— UTC相对于国际基准钟组（TT）的相对频率偏差。

如果满足式（13），则判定被测基准钟的输出钟跃迁频率在其自评定相对频率不确定度范围之内：

$$|y_{P-TT}| \leq 2\sqrt{(u_{P-A})^2 + (u_{P-B})^2 + (u_{P-link/lab})^2 + (u_{I/TAI})^2 + (u_{TT})^2} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

- $u_{P-A}$  —— 被测基准钟M天内的A类相对频率不确定度；
- $u_{P-B}$  —— 被测基准钟的B类相对频率不确定度；
- $u_{P-link/lab}$  —— 被测基准钟实验室链路相对不确定度；
- $u_{I/TAI}$  —— 从UTC(k)到TAI的链路相对不确定度(BIPM网站公布)；
- $u_{TT}$  —— 国际基准钟组加权平均频率的相对不确定度(BIPM网站公布)。

如果满足式（14），则判定被测次级基准钟的输出钟跃迁频率在其自评定相对频率不确定度范围之内：

$$|y_{S-TT}| \leq 2\sqrt{(u_{S-A})^2 + (u_{S-B})^2 + (u_{S-link/lab})^2 + (u_{rec})^2 + (u_{I/TAI})^2 + (u_{TT})^2} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- $u_{S-A}$  ——被测次级基准钟 $M$ 天内的A类相对频率不确定度；  
 $u_{S-B}$  ——被测次级基准钟的B类相对频率不确定度；  
 $u_{S-link/lab}$  ——被测次级基准钟实验室链路相对不确定度；  
 $u_{rec}$  ——被测次级基准钟的频率推荐值的相对不确定度；  
 $u_{I/TAI}$  ——从UTC( $k$ )到TAI的链路相对不确定度(BIPM网站公布)；  
 $u_{TT}$  ——国际基准钟组加权平均频率的相对不确定度(BIPM网站公布)。

## 7 冷原子微波守时钟性能表征

### 7.1 性能表征参数

冷原子微波守时钟输出频率为5 MHz、10 MHz或100 MHz的标准频率信号或秒脉冲信号，对其性能进行表征，主要对频率稳定度、相对频率偏差、频率复现性、频率漂移率和相位噪声等参数进行测试。

#### 7.1.1 频率稳定度

一般用时域上的阿伦标准偏差来表征。在未说明时，默认为相对频率稳定度。测量方法包括三种。

- a) 与参考频标拍频的频率稳定度。
- b) 两台同种冷原子微波守时钟直接拍频的频率稳定度。
- c) 三台冷原子微波守时钟互相拍频的频率稳定度。

#### 7.1.2 相对频率偏差

被测冷原子微波守时钟输出频率相对于复现秒定义（ $^{133}\text{Cs}$ ）的钟跃迁频率标称值的相对频率偏差。

#### 7.1.3 频率复现性

被测冷原子微波守时钟正常工作一段时间关机，再开机达到稳定后的频率值与关机时频率值的一致程度。用两次相对频率偏差之差表示。

#### 7.1.4 频率漂移率

单位时间内被测冷原子微波守时钟的输出频率相对于复现秒定义（ $^{133}\text{Cs}$ ）的钟跃迁频率标准值的相对频率漂移量。

注：一般用最小二乘法估算。取单位时间为日时，称为日漂移率。

#### 7.1.5 相位噪声

被测冷原子微波守时钟在各种噪声的作用下引起其输出信号相位的随机变化。它是衡量冷原子微波守时钟频率稳定度高的重要指标。

### 7.2 测量环境

按照GB/T 39724-2020中6.1规定的环境条件。

### 7.3 参测设备

#### 7.3.1 参考频标

输出频率：5 MHz、10 MHz或100 MHz；

频率稳定度：优于被测冷原子微波守时钟相同取样时间频率稳定度或与被测冷原子微波守时钟相同取样时间频率稳定度相当；

相位噪声：比被测冷原子微波守时钟相应傅立叶分析频率的相位噪声小10 dB。

注：参考频标可以选用一个或多个，分别满足上述要求。

### 7.3.2 秒长国家计量基准

输出频率：复现秒定义（ $^{133}\text{Cs}$ ）的钟跃迁频率，并给出其相对频率不确定度。

注：参考频标作为秒长国家计量基准的参考，其输出频率可溯源到复现秒定义的钟跃迁频率。

### 7.3.3 频标比对器

输入频率：5 MHz、10 MHz或100 MHz；比对不确定度（用阿仑标准偏差表示）小于被测冷原子微波守时钟相同取样时间的频率稳定度的 1/3；有外接频率参考功能。

### 7.3.4 相位噪声测量装置

输入频率：5 MHz、10 MHz或100 MHz；

傅立叶分析频率：1 Hz~100 kHz；

相位噪声本底：比被测冷原子微波守时钟在相应傅立叶频率点的相位噪声小10 dB；

有外接频率参考功能。

[来源：GB/T 39724-2020，6.2.3]

## 7.4 测量方法

### 7.4.1 频率稳定度

#### 7.4.1.1 与参考频标拍频的频率稳定度

频率稳定度测试框图如图6，取样时间和取样组数按表2选取。

注1：频标比对器需连接参考频标，以降低参测设备自身引入的偏差。

注2：当测量取样时间大于1 d时，参考频标需溯源至复现秒定义/次级定义的频率标准，以消除其自身漂移的影响。当测量取样时间不超过1 d时，参考频标无需溯源至上述频率标准。

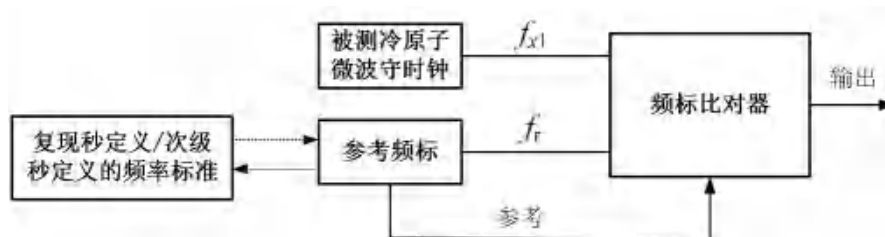


图6 被测冷原子微波守时钟与参考频标拍频的频率稳定度测试框图

表2 取样时间和取样组数

取样时间 $\tau$	取样组数 $m$
1 s	$\geq 300$
10 s	$\geq 100$
100 s	$\geq 50$
1000 s	$\geq 15$

10000 s	≥15
1 d	≥15
> 1 d	≥15

按以下方法进行测量。

- a) 参考频标的输出信号分为两路，同时接入频标比对器作为参考信号。被测冷原子微波守时钟的输出信号接入频标比对器作为被测信号。
- b) 启动测量，频标比对器自动记录被测冷原子微波守时钟相对于参考频标的相对频率偏差 $Y_{1r}$ 。
- c) 数据处理：

取样时间 $\tau \leq 1$  d的频率稳定度如下：

将测得的相对频率偏差 $Y_{1r}$ 数据序列代入阿伦偏差公式（1），计算得到 $\sigma_{y1r}(\tau)$ 。

当参考频标的频率稳定度已知，则被测冷原子微波守时钟的频率稳定度见公式（15）：

$$\sigma_{D0}(\tau) = \sqrt{\sigma_{y1r}^2(\tau) - \sigma_r^2(\tau)} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

$\sigma_{y1r}(\tau)$  ——相对频率偏差 $Y_{1r}$ 代入公式（1）计算得到的阿伦标准偏差；

$\sigma_r(\tau)$  ——已知参考频标的频率稳定度；

$\sigma_{D0}(\tau)$  ——被测冷原子微波守时钟的频率稳定度。

取样时间 $\tau > 1$  d的频率稳定度如下：

注：此时参考频标需链接至复现秒定义/次级定义的频率标准。

利用已知或同步测量得到的参考频标相对于复现秒定义/次级定义的频率标准的相对频率偏差 $Y_p$ ，对原始测量值 $Y_{1r}$ 进行修正，得到被测守时钟相对于复现秒定义/次级定义的频率标准的相对频率偏差 $Y_{1p}$ 见公式（16）：

$$Y_{1p} = Y_{1r} + Y_p \quad (16)$$

将 $Y_{1p}$ 代入阿伦偏差公式（1），计算得到 $\sigma_{y1p}(\tau)$ 。

被测冷原子微波守时钟的频率稳定度见公式（17）

$$\sigma_{D1}(\tau) = \sqrt{\sigma_{y1p}^2(\tau) - \sigma_p^2(\tau)} \quad (17)$$

式中：

$\sigma_{y1p}(\tau)$  ——相对频率偏差 $Y_{1p}$ 代入公式（1）计算得到的阿伦标准偏差；

$\sigma_p(\tau)$  ——已知复现秒定义/次级定义的频率标准的频率稳定度；

$\sigma_{D1}(\tau)$  ——被测冷原子微波守时钟的频率稳定度。

#### 7.4.1.2 两台同种冷原子微波守时钟直接拍频的频率稳定度

两台被测冷原子微波守时钟与频标比对器连接如图7，取样时间和取样组数按表2选取。

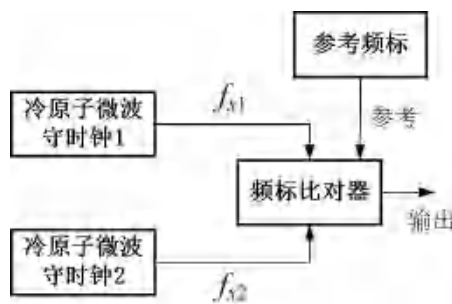


图7 两台同种冷原子微波守时钟直接拍频的频率稳定度测试框图

按以下方法进行测量。

- a) 将参考频标的输出信号连接至频标比对器，作为其频率参考。被测冷原子微波守时钟1（输出频率 $f_{x1}$ ）和被测冷原子微波守时钟2（输出频率 $f_{x2}$ ）分别接入频标比对器。
- b) 测量开始时，频标比对器自动记录两台守时钟之间的相对频率偏差 $Y_{12}$ 。
- c) 将相对频率偏差 $Y_{12}$ 代入阿伦标准偏差公式（1），计算得到 $\sigma_{y12}(\tau)$ 。  
当两台被测冷原子微波守时钟性能相近，单台被测冷原子微波守时钟的稳定度表示见公式（18）：

$$\sigma_D(\tau) = \frac{\sigma_{y12}(\tau)}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

$\sigma_{y12}(\tau)$  ——相对频率偏差 $Y_{12}$ 代入公式（1）计算得到的阿伦标准偏差；

$\sigma_D(\tau)$  ——被测冷原子微波守时钟的频率稳定度。

### 7.4.1.3 三台冷原子微波守时钟互相拍频的频率稳定度

对三台被测冷原子微波守时钟进行测试，需要两两相互拍频比对，任意两台被测冷原子微波守时钟与频标比对器连接均如图7。取样时间和取样组数按表2选取。

按以下方法进行测量。

- a) 参考频标的输出信号连接至频标比对器，作为其频率参考。将三台被测冷原子微波守时钟（输出频率分别为 $f_{x1}$ 、 $f_{x2}$ 、 $f_{x3}$ ）两两配对，分别接入频标比对器进行比对。
- b) 启动测量，频标比对器自动记录三组相对频率偏差：被测冷原子微波守时钟1与被测冷原子微波守时钟2之间的 $Y_{12}$ ，被测冷原子微波守时钟1与被测冷原子微波守时钟3之间的 $Y_{13}$ ，以及被测冷原子微波守时钟2与被测冷原子微波守时钟3之间的 $Y_{23}$ 。

注：为提高测量准确性，建议三组比对在相同时间段内同步进行，以减小各被测钟自身频率漂移及不同时段稳定度微小差异的影响。

- c) 将相对频率偏差 $Y_{12}$ 、 $Y_{13}$ 和 $Y_{23}$ 数据序列分别代入阿伦标准偏差公式（1），计算得到 $\sigma_{12}(\tau)$ 、 $\sigma_{13}(\tau)$ 和 $\sigma_{23}(\tau)$ 。三台被测冷原子微波守时钟相互独立，则各台被测钟的频率稳定度表示见式（19）：

$$\begin{cases} \sigma_1(\tau) = \sqrt{\frac{\sigma_{12}^2(\tau) + \sigma_{13}^2(\tau) - \sigma_{23}^2(\tau)}{2}} \\ \sigma_2(\tau) = \sqrt{\frac{\sigma_{12}^2(\tau) + \sigma_{23}^2(\tau) - \sigma_{13}^2(\tau)}{2}} \dots\dots\dots (19) \\ \sigma_3(\tau) = \sqrt{\frac{\sigma_{23}^2(\tau) + \sigma_{13}^2(\tau) - \sigma_{12}^2(\tau)}{2}} \end{cases}$$

式中：

$\sigma_1(\tau)$  ——被测冷原子微波守时钟1的频率稳定度；

$\sigma_2(\tau)$  ——被测冷原子微波守时钟2的频率稳定度；

$\sigma_3(\tau)$  ——被测冷原子微波守时钟3的频率稳定度；

$\sigma_{12}(\tau)$  ——利用相对频率偏差 $Y_{12}$ 计算得到的阿伦标准偏差；

$\sigma_{13}(\tau)$  ——利用相对频率偏差 $Y_{13}$ 计算得到的阿伦标准偏差；

$\sigma_{23}(\tau)$  ——利用相对频率偏差 $Y_{23}$ 计算得到的阿伦标准偏差。

### 7.4.2 相对频率偏差

基于频标比对器法的相对频率偏差测试框图如图8，取样时间和取样组数按表3选取。



图 8 频标比对器法测试被测冷原子微波守时钟的相对频率偏差测试框图

表 3 取样时间和取样组数

被测冷原子微波守时钟		取样时间 $\tau$	取样组数 $n$
频率稳定度 /1 d	相对频率偏差标称值		
$< 1 \times 10^{-15}$	$< 1 \times 10^{-15}$	1 d	$\geq 10$
$< 1 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-15} \sim 5 \times 10^{-15}$	1 d	$\geq 5$
$< 1 \times 10^{-15}$	$5 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-14}$	0.5 d	$\geq 5$
$< 1 \times 10^{-15}$	$> 1 \times 10^{-14}$	2 h	$\geq 5$
$1 \times 10^{-15} \sim 5 \times 10^{-15}$	$< 1 \times 10^{-15}$	2 d	$\geq 15$
$1 \times 10^{-15} \sim 5 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-15} \sim 5 \times 10^{-15}$	1 d	$\geq 10$
$1 \times 10^{-15} \sim 5 \times 10^{-15}$	$5 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-14}$	0.5 d	$\geq 5$
$1 \times 10^{-15} \sim 5 \times 10^{-15}$	$> 1 \times 10^{-14}$	2 h	$\geq 5$
$5 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-14}$	$1 \times 10^{-15} \sim 5 \times 10^{-15}$	1 d	$\geq 5$
$5 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-14}$	$5 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-14}$	0.5 d	$\geq 5$
$5 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-14}$	$> 1 \times 10^{-14}$	2 h	$\geq 5$

按以下方法进行测量。

- 参考频标的输出频率信号 ( $f_r$ ) 分为三路，第一路作为秒长国家计量基准的频率参考，溯源至复现秒定义 ( $^{133}\text{Cs}$ ) 的钟跃迁频率；第二路作为频标比对器的频率参考；第三路接入频标比对器作为测量参考信号。将被测冷原子微波守时钟的输出信号 ( $f_{x1}$ ) 接入频标比对器作为被测信号。
- 以取样时间  $\tau$  连续测量，获得第  $i$  个取样周期内，被测冷原子微波守时钟相对于参考频标的平均相对频率偏差  $Y_{1ri}(\tau)$ ，共测得  $n$  组数据。
- 秒长国家计量基准以同一参考频标作为频率参考，与步骤 b) 测量同步、同取样时刻、同取样时间  $\tau$  进行测量。得到第  $i$  个取样周期内，参考频标相对于复现秒定义 ( $^{133}\text{Cs}$ ) 的钟跃迁频率的平均相对频率偏差  $Y_{rpi}(\tau)$ ，共测得  $n$  组数据。

注1：第  $i$  个取样周期内，被测冷原子微波守时钟相对于复现秒定义 ( $^{133}\text{Cs}$ ) 的钟跃迁频率的平均相对频率偏差  $Y_i(\tau)$ ，见公式 (20)

$$Y_i(\tau) = Y_{1ri}(\tau) + Y_{rpi}(\tau) \tag{20}$$

式中：

$Y_{1ri}(\tau)$ ——第  $i$  个取样时间  $\tau$  内被测冷原子微波守时钟相对于参考频标的平均相对频率偏差；

$Y_{rpi}(\tau)$ ——第  $i$  个取样时间  $\tau$  内参考频标相对于复现秒定义 ( $^{133}\text{Cs}$ ) 的钟跃迁频率的平均相对频率偏差。

- 被测冷原子微波守时钟输出频率的相对频率偏差见式 (21)：

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{1ri}(\tau)}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n Y_{rpi}(\tau)}{n} - 1.09 \times 10^{-16} \cdot \Delta h \tag{21}$$

式中：

$Y$ ——被测冷原子微波守时钟输出频率的相对频率偏差；

$n$ ——取样组数；

$\Delta h$ ——被测冷原子微波守时钟与秒长国家计量基准所在位置的高度之差，单位为m。

注2：式中末项为引力红移修正，系数  $1.09 \times 10^{-16} \text{ m}^{-1}$  为理论值。

注3：若被测冷原子微波守时钟搬运至海拔高度  $h_1$ （单位：m）的地点A使用，需进一步修正引力红移，修正后的相对频率偏差  $Y_c$ ，见式（22）：

$$Y_c = Y - 1.09 \times 10^{-16} \cdot h_1 \quad (22)$$

式中：

$Y_c$ ——修正引力红移后的相对频率偏差；

$Y$ ——由式（21）计算得到的相对频率偏差；

$h_1$ ——使用地点A的海拔高度，单位为m。

e) 被测冷原子微波守时钟的相对频率偏差及其相对不确定度见式（23）：

$$A = Y \pm ku \quad (23)$$

式中：

$A$ ——被测冷原子微波守时钟的相对频率偏差（含相对不确定度）；

$k$ ——置信因子， $k$ 一般取值2；

$u$ ——总合成标准不确定度。总合成标准不确定度包含被测冷原子微波守时钟测量过程的统计不确定度、秒长国家计量基准的B类相对频率不确定度和测量系统不确定度。

注4： $u$ 的表达式见式（24）：

$$u = \sqrt{u_S^2 + u_{\text{PFS-B}}^2 + u_M^2} \quad (24)$$

式中：

$u_S$ ——被测冷原子微波守时钟测量过程的统计不确定度。由被测冷原子微波守时钟相对于秒长国家计量基准的  $n$  个平均相对频率偏差  $Y_i(\tau)$  数据计算其标准偏差，并换算为平均值的标准不确定度来表示，见式（25）：

$$u_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i(\tau) - Y)^2}{n(n-1)}} \quad (25)$$

式中：

$Y_i(\tau)$ ——第  $i$  个取样时间  $\tau$  内被测冷原子微波守时钟相对于秒长国家计量基准的平均相对频率偏差；

$Y$ ——由式（21）计算得到的相对频率偏差。

$u_{\text{PFS-B}}$ ——秒长国家计量基准的B类相对频率不确定度。

$u_M$ ——测量系统不确定度，主要由频率比对器本身的误差引起，通常根据设备说明书或校准证书给出。

### 7.4.3 频率复现性

频率复现性测试框图如图8。

按以下方法进行测量。

- 被测冷原子微波守时钟开机锁定，达到频率稳定（稳定时间  $T$  由产品说明或标准规定）。
- 按照7.4.2节a）、b）、c）、d）步骤测量，得到相对频率偏差  $Y_1$ 。
- 被测冷原子微波守时钟关机24 h。

注：用于维持被测冷原子微波守时钟物理系统真空度的真空泵可保持运行。

- 被测冷原子微波守时钟再次开机锁定并达到频率稳定。
- 再次按照7.4.2节中a）、b）、c）、d）步骤测量，得到相对频率偏差  $Y_2$ 。
- 在得到相对频率偏差  $Y_1$  和  $Y_2$  后，计算频率复现性  $R$  见式（26）：

$$R = |Y_1 - Y_2| \dots\dots\dots (26)$$

式中：

$Y_1$ ——第一次测量得到的被测冷原子微波守时钟输出频率的相对频率偏差；

$Y_2$ ——第二次测量得到的被测冷原子微波守时钟输出频率的相对频率偏差。

#### 7.4.4 频率漂移率

频率漂移率测试框图如图8所示，采用频标比对器连续测量，总测量时长不少于15 d。

按以下方法进行测量。

- 取样时间 $\tau=1$  d，按照7.4.2节中步骤a)、b)、c) 进行测量，获得 $n$ 个平均相对频率偏差 $Y_i(\tau)$ ，其中 $n \geq 15$ 。
- 根据公式(27)计算日漂移率 $K$ ，给出频率变化曲线。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \{Y_i(\tau) - \bar{Y}(\tau)\} \cdot (T_i - \bar{T})}{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \quad (27)$$

式中：

$K$ ——日频率漂移率；

$n$ ——取样次数；

$Y_i(\tau)$ ——第 $i$ 个测量区间 $[t_{i-1}, t_i]$ 内，被测冷原子微波守时钟相对于复现秒定义( $^{133}\text{Cs}$ )钟跃迁频率的平均相对频率偏差， $\tau=1$  d；

$t_i$ ——第 $i$ 个测量区间的结束时刻，单位为天；取 $t_0=0$ ，则 $t_i=i$ 天；

$T_i$ ——第 $i$ 个测量值 $Y_i(\tau)$ 的等效时刻， $T_i = \frac{t_{i-1} + t_i}{2} = (i - 0.5)$ 天；

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i;$$

$$\bar{Y}(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i(\tau)。$$

#### 7.4.5 相位噪声

相位噪声测试框图如图9。为了减小测量仪器带来的额外测量偏差，相位噪声测量装置需要接参考频标作为参考。利用相位噪声测量装置直接测量，傅立叶分析频率取1 Hz~100 kHz。



图9 被测冷原子微波守时钟的相位噪声测试框图

按以下方法进行测量。

- 将参考频标的输出频率信号 $f_r$ 分为两路，一路作为相位噪声测量装置的参考频率，另一路连接至相位噪声测量装置，作为测量用的参考信号。被测冷原子微波守时钟的输出频率信号 $f_{x1}$ 连接至相位噪声测量装置，作为测量信号。

b) 启动相位噪声测量装置，自动完成测试，并显示出相位噪声随傅立叶分析频率完整的测试曲线。

## 7.5 测试报告

测试报告至少应包括：

- 本文件编号；
- 性能测试所使用的方法；
- 测试结果；
- 观察到的异常现象；
- 测试日期。

注1：测试报告记录被测冷原子微波守时钟的频率稳定度，如秒稳 ( $\tau=1$  s)、十秒稳( $\tau=10$  s)、百秒稳( $\tau=100$  s)、千秒稳( $\tau=1000$  s)、万秒稳( $\tau=10000$  s)、天稳( $\tau=1$  d)等。

注2：测试报告记录被测冷原子微波守时钟的相对频率偏差，包括取样时间、取样组数、计算得到的相对频率偏差及其相对不确定度，以及被测钟所在海拔高度。

注3：测试报告记录被测冷原子微波守时钟的频率复现性，包括：取样时间、取样时间内被测钟的相对频率偏差、频率复现性、关机时间以及频率达到稳定的时间等。

注4：测试报告记录被测冷原子微波守时钟的频率漂移率，包括：取样时间和取样组数、各组取样组内被测钟与参考频标以及参考频标与复现秒定义 ( $^{133}\text{Cs}$ ) 的平均相对频率偏差、被测钟的相对频率偏差及其频率漂移率等。

注5：测试报告记录被测冷原子微波守时钟的相位噪声，包括傅立叶频率 $f=1$  Hz、10 Hz、100 Hz、1 kHz、10 kHz、100 kHz处的单边带相位噪声值及相位噪声随傅立叶分析频率的变化曲线。

## 附录 A

(资料性)

## 秒定义次级表示的频率推荐值

表 A.1 国际单位制中秒定义次级表示的频率推荐值及不确定度

序号	原子	推荐值 (Hz)	相对不确定度
1	$^{199}\text{Hg}$	1 128 575 290 808 154.32	$2.4 \times 10^{-16}$
2	$^{199}\text{Hg}^+$	1 064 721 609 899 146.96	$2.2 \times 10^{-16}$
3	$^{27}\text{Al}^+$	1 121 015 393 207 859.16	$1.9 \times 10^{-16}$
4	$^{171}\text{Yb}^+$ (四极)	688 358 979 309 308.24	$2.0 \times 10^{-16}$
5	$^{171}\text{Yb}^+$ (八极)	642 121 496 772 645.12	$1.9 \times 10^{-16}$
6	$^{171}\text{Yb}$	518 295 836 590 863.63	$1.9 \times 10^{-16}$
7	$^{88}\text{Sr}^+$	444 779 044 095 486.3	$1.3 \times 10^{-15}$
8	$^{88}\text{Sr}$	429 228 066 418 007.01	$2.0 \times 10^{-16}$
9	$^{87}\text{Sr}$	429 228 004 229 872.99	$1.9 \times 10^{-16}$
10	$^{40}\text{Ca}^+$	411 042 129 776 400.4	$1.8 \times 10^{-15}$
11	$^{87}\text{Rb}$	6 834 682 610.904 312 6	$3.4 \times 10^{-16}$

注：数据来自于国际计量局官网：<https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies-second>，推荐值及不确定度更新时间2021年。

## 附录 B (规范性)

### 被测基准钟的 A 类相对频率不确定度计算方法

#### B.1 被测基准钟高低密度交替运行时 A 类相对频率不确定度计算方法

通过改变选态微波功率,可获得具有不同原子密度的原子云。设置两种不同的选态微波功率,使被测基准钟在高密度和低密度两种原子云分布下交替闭环运行 $n$ 天。分别记录高密度下的原子数 $N_H$ ,高密度下给出的守时钟的相对频率偏差 $y_H$ ,低密度下的原子数 $N_L$ 以及低密度下给出的守时钟的相对频率偏差 $y_L$ 。

进一步得到被测基准钟在零密度时给出的守时钟的相对频率偏差 $y_Z$ 表示见式 (B-1)

$$y_Z = \frac{\gamma y_L - y_H}{\gamma - 1} \dots\dots\dots (B-1)$$

式中:

$y_Z$ ——零密度下给出的守时钟的相对频率偏差;

$y_H$ ——高密度下测量得到的守时钟的相对频率偏差;

$y_L$ ——低密度下测量得到的守时钟的相对频率偏差;

$\gamma$ ——高、低密度原子数比,  $\gamma = N_H/N_L$ 。

根据公式 (B-1), 推算被测基准钟在零密度时的相对频率稳定度 $\sigma_Z(\tau)$  表示见式 (B-2)

$$\sigma_Z(\tau) = \sqrt{\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)^2 \sigma_L^2(\tau_L) + \left(\frac{1}{\gamma-1}\right)^2 \sigma_H^2(\tau_H) + \left(\frac{y_L - y_H}{(\gamma-1)^2}\right)^2 \sigma_\gamma^2} \dots\dots\dots (B-2)$$

式中:

$\sigma_Z(\tau)$ ——被测基准钟在零密度时的相对频率稳定度 (阿伦标准偏差);

$\sigma_H(\tau_H)$ ——由高密度下的相对频率偏差 $y_H$ 按公式 (1) 计算得到的阿伦标准偏差;

$\sigma_L(\tau_L)$ ——由低密度下的相对频率偏差 $y_L$ 按公式 (1) 计算得到的阿伦标准偏差;

$\sigma_\gamma$ ——高低密度原子数比 $\gamma$ 的不确定度。

注: 一般 $\tau_L = \tau_H$ 。

公式 (B-2) 右侧前两项为被测基准钟由频率测量噪声引入的 A 类相对频率不确定度; 第三项由冷原子碰撞引入的 B 类相对频率不确定度分项, 该项表达式见式 (B-3)

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\text{collision}} = \left| \frac{y_H - y_L}{(\gamma-1)^2} \right| \sigma_\gamma \\ \sigma_\gamma^2 = \sigma_{\text{nonlinear}}^2 + \left[ \left( \frac{\delta N_L}{N_L} \right)^2 + \left( \frac{\delta N_H}{N_H} \right)^2 \right] \gamma^2 \end{array} \right. \dots\dots\dots (B-3)$$

式中:

$u_{\text{collision}}$ ——冷原子碰撞引起的 B 类相对频率不确定度分项;

$\sigma_{\text{nonlinear}}$ ——测量原子数与原子密度之间的非线性引入的不确定度;

$\delta N_H$ ——高密度时原子数的测量不确定度;

$\delta N_L$ ——低密度时原子数的测量不确定度。

在得到被测基准钟在零密度时的相对频率稳定度 $\sigma_Z(\tau)$ 曲线后, 获得天稳。对于连续运行 $n$ 天的被测基准钟, 其 A 类相对频率不确定度 $u_A$ 表示见式 (B-4):

$$u_A = \frac{\sigma_{1d}}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (B-4)$$

式中：

$u_A$  ——被测基准钟的A类相对频率不确定度；

$\sigma_{1d}$  ——被测基准钟在零密度时的天稳；

$n$  ——被测基准钟连续运行的天数。

## B.2 被测基准钟单一密度运行时 A 类相对频率不确定度计算方法

若被测基准钟的冷原子碰撞频移系数  $k$  已知且长时间稳定，可采用单一原子云密度模式进行测量。 $k$  可通过高密度和低密度模式下的历史测量数据计算：

$$k = \frac{y_L - y_H}{N_H - N_L} \dots\dots\dots (B-5)$$

式中：

$N_H$  ——高密度时的原子数；

$N_L$  ——低密度时的原子数；

$y_H$  ——高密度时测量得到的守时钟的相对频率偏差；

$y_L$  ——低密度时测量得到的守时钟的相对频率偏差。

被测基准钟在单一密度下连续运行  $n$  天，记录原子数  $N_{P-S}$  及守时钟的相对频率偏差  $y_{P-S}$ 。

零密度下的相对频率偏差  $y_{Z1}$  按式 (B-6) 修正得到：

$$y_{Z1} = y_{P-S} + N_{P-S} \cdot k \dots\dots\dots (B-6)$$

零密度下的相对频率稳定度  $\sigma_{Z1}(\tau)$  由不确定度传播律计算：：

$$\sigma_{Z1}(\tau) = \sqrt{\sigma_{P-S}^2(\tau) + N_{P-S}^2 \sigma_k^2 + k^2 \sigma_{NPS}^2} \dots\dots\dots (B-7)$$

式中：

$\sigma_{P-S}(\tau)$  ——将相对频率偏差  $y_{P-S}$  序列代入公式 (1) 计算得到的阿伦标准偏差；

$\sigma_{NPS}$  ——原子数  $N_{P-S}$  的测量稳定度（通常由其统计波动评定）；

$\sigma_k$  ——冷原子碰撞频移系数  $k$  的稳定度（根据历史测量数据评定）。

在得到被测基准钟在零密度时的相对频率稳定度  $\sigma_{Z1}(\tau)$  曲线后，获得天稳。根据公式 (B-4) 获得被测基准钟的A类相对频率不确定度  $u_A$ 。

参 考 文 献

- [1] GB/T 27418-2017 测量不确定度评定和表示
- [2] IEEE Std 1139-2022 基本频率和时间计量随机不稳定性物理量定义 (IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology—Random Instabilities)
- [3] ISBN: 9787030448903 计量学名词.XXXX, 对应的国际文件为国际计量局发布的 the International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology 的最新版本
-