

《冷原子微波钟性能表征及测量方法》

国家标准编制说明

(征求意见稿)

2026年4月10日

目 录

一、工作简况.....	1
(一) 任务来源及协作单位.....	1
(二) 制定背景.....	1
(三) 主要工作过程.....	3
(四) 国家标准主要起草人及其所做的工作.....	7
二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据.....	9
(一) 标准编制原则和依据.....	9
(二) 标准主要技术内容说明.....	9
(三) 标准中主要技术内容确定的依据和过程.....	10
三、试验验证情况的说明.....	13
(一) 主要试验的分析.....	13
(二) 主要试验验证的分析、综述报告.....	14
(三) 试验方案设计.....	15
(四) 试验结果.....	15
四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况.....	16
五、标准采用国际文件的情况说明.....	16
六、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系.....	16
七、制修订过程中重大分歧意见的处理过程.....	16
八、标准中涉及专利的情况.....	16
九、国家标准性质的建议及贯彻国家标准的要求和措施建议.....	16
十、其他应予说明的事项.....	17
附件 1 《冷原子微波钟性能表征及测量方法》实验测试报告 1.....	19
附件 2 《冷原子微波钟性能表征及测量方法》实验测试报告 2.....	44
附件 3 《冷原子微波钟性能表征及测量方法》实验测试报告 3.....	59

一、工作简况

（一）任务来源及协作单位

2024年6月3日，国家标准化管理委员会发布《关于下达2025年第五批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》（国标委发〔2025〕28号），下达了《微波冷原子钟性能表征及测量方法》推荐性国家标准的制定任务，计划号为20251606-T-469，外文版计划号为W20255624，任务周期18个月。本标准由全国量子技术标准化技术委员会（SAC/TC 578）提出并归口管理，起草单位包括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等共同负责标准起草。其中，中国计量科学研究院为该标准起草工作的牵头单位。

（二）制定背景

2020年10月16日，中共中央总书记习近平在中央政治局第二十四次集体学习时强调，要充分认识推动量子科技发展的重要性和紧迫性，统筹基础研究、前沿技术、工程技术研发，培育量子通信等战略性新兴产业，抢占量子科技国际竞争制高点，构筑发展新优势。

在国家顶层布局和相关部委的大力支持下，我国量子信息技术整体处于国际领先地位，正处于从技术领先向产业综合领先发展的关键时期，急需标准化工作的指导。特别在中共中央、国务院于 2021 年 10 月印发的《国家标准化发展纲要》中，将“推动标准化与科技创新互动发展”放在五大任务之首，提出要加强关键技术领域标准研究，以科技创新提升标准水平，健全科技成果转化标准的机制。《纲要》明确指出，要“在人工智能、量子信息、生物技术等领域，开展标准化研究……部分领域关键标准适度领先于产业发展平均水平。”

量子精密测量是量子信息技术三大核心支柱之一，既是量子计算与量子通信的底层支撑，也是连接微观量子态与宏观应用的关键接口，决定着量子技术的精度上限与实用化进程。我国在“十四五”、“十五五”规划和 2035 年远景目标纲要中，明确将量子精密测量等列为国家重大战略需求。美国、欧盟、日本等发达强国均对量子精密测量布局了系列重大研究计划与项目。频率精密测量是量子精密测量的重要方向之一。原子钟所给出的频率是测量准确度最高的物理量，因此原子钟成为量子精密测量的重要方向之一，其支撑了国家时间频率体系构建和量子精密测量技术发展。虽然光钟的不确定度指标已经进入 E-19 量级，但其技术复杂度限制了推广使用，微波钟依然被广泛使用。其中，冷原子微波钟利用冷原子团为量子参考体系，具有高频率稳定度、高频

率准确度、低频率漂移和高频率复现性的优势，可独立守时，广泛用于守时授时、卫星导航、深空探测、计量测绘、高速通信、电力电网、科学研究等领域。

（三）主要工作过程

2024年3月27日，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成立前期工作组，启动《冷原子微波钟性能表征及测量方法》标准的起草准备工作；2024年9月27日，前期工作组向全国量子技术标准化技术委员会（SAC/TC578）提交了标准的立项申报资料；2025年1月24日，全国量子技术标准化技术委员会（SAC/TC578）全体委员投票表决通过立项申请（投票详情：参与52人，赞成51人，弃权1人，委员总数58人）；2025年2月20日，完成立项答辩；2025年3月18日，完成新版标准草案和推荐性国家标准建议书的编制工作；2025年3月25日，完成立项评估；2025年4月10日，完成项目审核并进行网上公示；2025年5月10日，完成立项公示。

2025年6月3日，国家标准化管理委员会批准立项申请，正式下达《微波冷原子钟性能表征及测量方法》推荐性国家标准的制定任务，计划号：20251606-T-469，任务周期18个月。任务下达后，技术归口单位全国量子技术标准化技术委员会，会同项

目牵头单位中国计量科学研究院，面向领域内相关科研院所、企事业单位、社会团体等，广泛开展了标准编写工作组成员单位/起草专家的征集工作。

2025年12月17日，《微波冷原子钟性能表征及测量方法》国家标准编写工作组正式成立。起草工作组由来自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等共9个单位的19名专家构成。郑发松副研究员任组长，组员有房芳、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、赵可沦、陈法喜、李立波、高帅和等。国家标准启动会暨第一次工作组会议在济南量子技术研究院召开，为“线上线下结合”的会议方式。会议由标准第一起草人中国计量科学研究院郑发松副研究员主持，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、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、成都天奥电子股份有限公司等9家单位的18位专家出席。会议进行了编写工作任务分工，制定了编写工作计划，并要求各单位对标准草案进行意见反馈。本次会议共收到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、成都天奥电子股份有限公司、北京无线电计量测试研究所（航天科工二院 203 所）、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等单位提出的修改意见 27 条。

2025 年 12 月 18 日至 12 月 29 日，工作组认真研究并完成了对 27 条意见的修改，形成讨论稿（第二稿），并将讨论稿（第二稿）发送给工作组全体成员单位。

2025 年 12 月 30 日至 2026 年 1 月 9 日，工作组全体成员单位对讨论稿（第二稿）进行第二次分工审阅，共收到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、成都天奥电子股份有限公司、北京无线电计量测试研究所、济南量子技术研究院、合肥国家实验室、广电计量检测集团股份有限公司等单位提出的修改意见 36 条。

2026 年 1 月 9 日至 2026 年 1 月 13 日，工作组认真研究并完成了对 36 条意见的修改，形成讨论稿（第三稿），并将讨论稿（第三稿）发送给工作组全体成员单位。

2026 年 1 月 16 日，工作组召开第二次工作会议，本次为线上会议，由第一起草人中国计量科学研究院郑发松副研究员主持，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、成都天奥电子股份有限公司、北京无线

电计量测试研究所、济南量子技术研究院、合肥国家实验室、广电计量检测集团股份有限公司等 9 家单位的 17 位专家出席。会议首先回应了第一次工作组会征求的主要意见，并汇报了针对该轮意见的最终修改结果。随后，汇报了针对起草工作组第二次分工审阅（2025 年 12 月 30 日—2026 年 1 月 9 日）反馈意见的修改结果，并就其中主要意见组织参会人员进行了讨论；该轮分工审阅共收到意见 36 条。针对修改后的标准草案讨论稿（第三稿）的内容再次逐条讨论，征询意见。会议共收到修改意见 13 条。

2026 年 1 月 20 日，工作组完成对第二次会议收集的修改意见处理，形成讨论稿（第四稿），并将讨论稿（第四稿）发送给工作组全体成员单位。

2026 年 1 月 20 日至 2026 年 3 月 20 日，工作组全体成员单位对讨论稿（第四稿）进行第三次分工审阅，共收到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、成都天奥电子股份有限公司、北京无线电计量测试研究所、济南量子技术研究院、中国科学技术大学等单位提出的修改意见 18 条。

2026 年 3 月 20 日至 2026 年 4 月 2 日，工作组认真研究并完成了对 18 条意见的修改，形成讨论稿（第五稿），并将讨论稿（第五稿）发送给工作组全体成员单位。

2026年4月16日，工作组召开第三次工作会议，本次为线上会议。会议由第一起草人中国计量科学研究院郑发松副研究员主持，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、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、成都天奥电子股份有限公司等8家单位的18位专家出席。会议介绍了起草工作组针对征求意见的逐条回应和相应的修改结果，随后针对讨论稿（第五稿）的内容再次逐条讨论，征询意见。

2026年4月20日，工作组完成对第三次会议收集的修改意见处理，形成讨论稿（第六稿），并将讨论稿（第六稿）发送给工作组全体成员单位。

2026年4月22日，工作组9家单位全体成员代表所属单位投票表决，投票结果同意对工作组讨论稿（第六稿）修改完善后，形成征求意见稿和征求意见稿编制说明，向TC578标委会秘书处提交。投票情况：应参加投票单位9家，实际参加投票单位9家，同意9家，反对0家，弃权0家。

（四）国家标准主要起草人及其所做的工作

本标准由中国计量科学研究院作为牵头单位，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等单位共同负责标准起草。主要起草人员及其工作如下表 1:

表 1 标准起草人员及主要工作

序号	姓名	单位	联系方式	主要工作
1.	郑发松	中国计量科学研究院	zhengfs@nim.ac.cn	牵头标准预研, 负责标准制定全面工作, 包括制定和推进工作计划、文件收集、提出标准整体框架和主要技术内容, 参与讨论、提供意见建议
2.	房芳	中国计量科学研究院	fangf@nim.ac.cn	参与标准预研, 参与标准制定全面工作, 起草标准与编制说明, 组织标准关键技术验证, 参与讨论、提供意见和建议
3.	刘昆	中国计量科学研究院	yulinwu@ustc.edu.cn	参与标准预研, 起草标准与编制说明, 组织标准关键技术验证, 参与讨论、提供意见和建议
4.	陈伟亮	中国计量科学研究院	chenwl@nim.ac.cn	参与标准预研, 起草标准与编制说明, 组织标准关键技术验证, 参与讨论、提供意见和建议
5.	王心亮	中国科学院国家授时中心	wangxl@ntsc.ac.cn	参与标准预研, 起草标准与编制说明, 参与讨论、提供意见和建议
6.	吕德胜	中国科学院上海光学精密机械研究所	dslv@siom.ac.cn	参与标准预研, 起草标准与编制说明, 参与讨论、提供意见和建议
7.	阮军	中国科学院国家授时中心	ruanjun@ntsc.ac.cn	参与标准预研, 起草标准与编制说明, 参与讨论、提供意见和建议
8.	王秀梅	北京无线电计量测试研究所	wangxiumei202303@163.com	参与标准预研, 起草标准与编制说明, 参与讨论、提供意见和建议
9.	任伟	中国科学院上海光学精密机械研究所	renweimiao87@siom.ac.cn	参与标准预研, 起草标准与编制说明, 参与讨论、提供意见和建议
10.	王新文	成都天奥电子股份有限公司	jzwijert@163.com	参与标准预研, 起草标准与编制说明, 参与讨论、提供意见和建议
11.	王亮	北京无线电计量测试研究所	13301028378@163.com	参与标准预研, 起草标准与编制说明, 参与讨论、提供意见和建议
12.	张华青	济南量子技术	zhanghuaqing@jiqt	参与讨论、提供意见和建议

		研究院	.org	
13.	戴汉宁	中国科学技术大学	daihan@ustc.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议
14.	张志强	合肥国家实验室	zhang-zhiqiang@ustc.edu.cn	参与讨论、提供意见和建议
15.	王超凡	济南量子技术研究院	wangchaofan@jiqt.org	参与讨论、提供意见和建议
16.	赵可沦	广电计量检测集团股份有限公司	zhaokl@grgtest.com	参与讨论、提供意见和建议
17.	陈法喜	济南量子技术研究院	chenfaxi@jiqt.org	参与讨论、提供意见和建议
18.	李立波	济南量子技术研究院	lilibo@jiqt.org	参与讨论、提供意见和建议
19.	高帅和	中国科学院国家授时中心	gaoshuaihe@ntsc.ac.cn	参与讨论、提供意见和建议

二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据

(一) 标准编制原则和依据

本标准文件按照 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。

(1) 在国内当前的技术条件下实现标准化目标具有完全可能性。

(2) 本项目的技术与主流技术发展方向相符合。

(3) 当前技术条件下标准可实现。

(二) 标准主要技术内容说明

本文件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。

本标准的主要技术内容如下：1 范围、2 规范性引用文件、3 术语和定义、4 冷原子微波钟概述（基本原理、分类、系统组成、功能和性能表征参数）、5 基准钟/次级基准钟性能表征（性能表征参数、测量环境、参测设备、测量方法和测试报告）、6 基准钟/次级基准钟不确定度评价方法（与秒长国家计量基准、国际基准钟组进行频率比对）、7 冷原子微波守时钟性能表征（性能表征参数、测量环境、参测设备、测量方法和测试报告）。

（三）标准中主要技术内容确定的依据和过程

本标准在确定冷原子微波钟性能表征及测量方法等核心技术内容时，首先立足国内外原子钟标准体系现状与产业发展现实需求。当前热原子微波钟、光钟均已出台相应国家标准或校准规范，而冷原子微波钟尚无国际、国家及行业层面统一标准，致使行业性能测试方法混乱、结果缺乏可比性，严重制约产业规范化发展。为规避无序竞争、保障行业健康有序推进，标准研制以填补冷原子微波钟标准空白、统一量子精密测量领域通用技术要求为核心依据，结合产业发展需求提前规划布局，确立了标准的整体技术框架与定位。

产业发展现实需求方面，当前微波冷原子钟已进入全面实用化阶段，诞生了喷泉钟、积分球钟等多种产品形态，法国 μ QUANS、美国 A0sense、美国 SDI 公司、国内成都天奥电子等企业均已推出商品化产品，中国计量科学研究所的铯喷泉和铷喷泉钟也实现

了商品化，产业规模逐步扩大。但目前冷原子微波钟相关的国际标准、国家标准、行业标准均未发布，导致不同用户测试方法不统一、结果参差不齐，严重制约产业规范化发展，也存在无序竞争、市场垄断的潜在风险。基于此，标准核心技术内容围绕“规范测试方法、统一性能指标、保障公平竞争”展开，明确性能表征范围与测量流程，为产业健康发展提供支撑，同时助力我国在该领域提升国际话语权。

在技术内容选取上，本标准充分依据冷原子微波钟的技术特性与应用分类特点。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/次级基准钟输出复现秒定义（ ^{133}Cs ）/次级定义（ ^{87}Rb ）的钟跃迁频率，一般为喷泉钟，确定了两项性能表征参数（相对频率不确定度和运行率），以及两种不确定度评价方法（对自评定得到的相对频率不确定度进行评价）。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首要要求的是系统工作的连续性、稳定性和复现性，确定了五项性能表征参数（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）。

本标准中的相对频率不确定度（含 A 类、B 类）、频率稳定度、频率复现性、频率漂移率、相位噪声等指标，参考了国际上

通用的冷原子微波钟性能评估框架(如国际时间频率咨询委员会(CCTF)的基准工作组(WG.PFS)评定建议),确保标准与国际先进技术水平接轨。各项指标的阈值(如A类相对频率不确定度与频率稳定度的关联要求、B类相对频率不确定度的物理效应评定标准)参考了当前冷原子微波钟技术的主流水平,例如喷泉钟(基准钟/次级基准钟典型类型)、冷原子守时钟等不同应用类型的典型性能参数,兼顾了标准的先进性和工程实现的可行性;其中次级基准钟总不确定度中包含的频率推荐值相对不确定度,严格参照国际计量局给出的相关要求设定。

在测试方法的步骤上,本标准方法建立过程中,综合考虑了当前国内外冷原子微波钟研发课题组的技术路线以及国际上通用的性能评估框架,对冷原子微波钟两类核心应用场景(基准钟/次级基准钟、冷原子微波守时钟)的性能指标体系做了详细介绍,明确了各类指标的评定方法和测试流程,保证测试方法的可操作性和可重复性。其中,针对基准钟/次级基准钟自评定得到的相对频率不确定度,明确了与秒长国家计量基准或国际基准钟组进行频率比对的评价方式,严格遵循国际时间频率咨询委员会(CCTF)的基准工作组(WG.PFS)的相关评定建议;针对冷原子微波守时钟,细化了5 MHz、10 MHz、100 MHz标准频率信号及秒脉冲信号输出特性的测试步骤,明确了频率稳定度、相对频率偏差等关键指标的代表方法,确保各项指标测试结果的准确性和可

比性；同时，明确了运行率指标的测试流程，用于衡量特定时间间隔内基准钟/次级基准钟的运行情况。因此，在具体指标与测试方法制定过程中，本标准遵循导向性、科学性、典型性、可操作性和可扩展性基本原则，结合冷原子微波钟自身技术规律，提炼能够客观反映器件核心性能的关键指标，规范测试流程与判定方式，既保证技术内容科学可靠、具有典型代表性，又兼顾方法易于实施、便于推广，同时预留调整扩充空间，以适配冷原子微波钟技术持续迭代升级的发展需求。

三、试验验证情况的说明

本标准中涉及的验证实验数据见标准文档的附件及测试报告所示。

（一）主要试验的分析

本标准对冷原子微波钟性能提供测试评估方法，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}Cs ）/次级定义（ ^{87}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。基准钟/次级基准钟的性能表征参数包括三项，分别为 A 类相对频率不确定度、B 类相对频率不确定度和运行率。此外，为验证基准钟/次级基准钟自评定得到的相对频率不确定度，需要给出基准钟/次级基准钟不确定度的评价方法。

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，性能表征参数主要包括五项，分别为频率稳定度、相对频率偏差、频率复现性、频率漂移率和相位噪声。

（二）主要试验验证的分析、综述报告

本标准所采用的测试与评估方法，是严格参照国际上通用的冷原子微波钟性能评估框架，结合国内外冷原子微波钟研发、生产及计量实践，经过长期验证与优化后确定的。其中，基准钟/次级基准钟的核心方法充分借鉴了国际时间频率咨询委员会（CCTF）基准工作组（WG.PFS）的评定建议，同时冷原子微波守时钟通过公开发表论文调研、企业实地对接等方式，系统梳理了法国 μ QUANS、美国 AOsense、美国 SDI、成都天奥电子等国内外主流企业的实际测试经验，整合了中国计量科学研究院、各院所科研课题组的大量试验数据，全面保障了方法的科学性、通用性与实用性。

为充分验证本标准所用方法的有效性与可靠性，开展了系列试验验证工作，覆盖基准钟/次级基准钟、冷原子微波守时钟两大核心品类，涉及铯喷泉钟及冷原子微波守时钟产品，试验数据均来自国内权威科研机构与主流生产企业，具有广泛代表性。在基准钟/次级基准钟领域，采用本标准方法对铯喷泉钟、铷喷泉钟的相对频率不确定度进行反复测试与评估，测试结果与国际基准钟组比对数据的偏差控制在自评定的不确定度范围内，一致性良好，

证明了方法在高性能基准钟评估中的有效性；在冷原子微波守时钟领域，针对 100 MHz 标准频率信号的输出特性，开展测试，包括频率稳定度、相对频率偏差、频率复现性和频率漂移率的测试，能够有效解决此前行业内测试方法混乱、结果无法相互印证、产品质量判定无统一依据的突出痛点。

综合试验验证结果来看，本标准所用测试与评估方法完全适配冷原子微波钟的技术特性与应用场景，能够客观、准确地表征各类冷原子微波钟的核心性能指标，测试流程规范、可操作、可追溯，与国际先进评估方法接轨，同时贴合我国产业发展实际，兼顾先进性与工程可行性。本标准方法的确定，不仅为冷原子微波钟的性能优化、产品迭代提供了科学的测试支撑，推动产业技术水平的整体提升，还为我国参与冷原子微波钟领域国际标准制定、提升国际话语权提供了坚实的试验数据支撑与技术储备，助力我国在量子精密测量领域实现标准化、规范化发展，进一步巩固我国在冷原子微波钟商品化、产业化领域的优势地位，为行业高质量发展提供有力保障。

（三）试验方案设计

- 试验对象准备：基准钟、冷原子微波守时钟。
- 实验结果见试验验证报告。

（四）试验结果

基于上述验证试验数据的结果，可以得出结论：依据国内现有硬件条件，本标准在国内可以有效实施。

四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况

国际、国外暂未发布同类标准。

五、标准采用国际文件的情况说明

本标准未采用国际文件。

六、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

经查，本标准与现有标准及制定中的标准无交叉重复，不涉及国内外专利，与有关的现行法律、法规和强制性国家标准无冲突。

七、制修订过程中重大分歧意见的处理过程

本标准制定过程中无重大分歧意见。

八、标准中涉及专利的情况

未发现涉及相关专利。

九、国家标准性质的建议及贯彻国家标准的要求和措施建议

鉴于本标准规定内容不涉及人身健康和生命财产安全、国家安全、生态环境安全等内容，属于基础性标准。根据标准化法及有关规定，建议本标准作为推荐性国家标准。

本标准的建议实施日期为：自发布之日起6个月。

本标准的实施，为我国冷原子微波钟（基准钟/次级基准钟和冷原子微波守时钟）性能评价及测试方法提供了规范，通过建立

起科学合理的评估指标和测试方法，减少相关研究和应用中的标准不统一或缺失现象，避免冷原子微波钟性能定义混乱、测量标准不统一的问题，推动该领域研发、交流与技术进步，为冷原子微波钟及量子精密测量相关领域标准化工作奠定基础。

建议保证标准文本的充足供应，使各相关方能够及时获取标准文本。对于标准使用过程中容易出现的疑问，工作组做好必要、及时的解释工作。针对不同的使用对象，有侧重点地进行标准培训和宣贯，以保证标准的贯彻实施。

十、其他应予说明的事项

编写工作组承诺，本标准文件无版权风险。

本标准立项阶段确定的名称原为《微波冷原子钟性能表征及测量方法》。经起草工作组研究论证，考虑到“微波冷原子钟”并非本领域及行业内的规范技术术语，为避免歧义，确保标准名称的准确性与规范性，工作组决定将标准名称修改为《冷原子微波钟性能表征及测量方法》。

本标准立足量子精密测量—冷原子微波钟产业发展的共性技术需求，以统一性能测试方法、规范市场评价体系为目标。在起草过程中，严格遵循“开放、公平、公正”原则，充分吸纳了产学研用各类市场主体的意见，未设置任何排除、限制竞争的条款，未偏袒特定主体或技术路线。标准内容符合国家公平竞争相

关法律法规及政策要求，能够为各类市场主体提供平等的技术依据和竞争环境。

编写工作组承诺，本标准编写过程中未参考或引用任何受版权保护的文本、图表、数据或其他专有内容，本标准无版权风险，在标准后续征求意见、审定及实施过程中，将持续保障公平竞争原则的落实，确保标准的中立性和公正性。

《冷原子微波钟性能表征及测量方法》国家标准编写工作组

2026年4月20日

附件 1

《冷原子微波钟性能表征及测量方法》

实验测试报告 1

1、被测基准钟/次级基准钟

被测基准钟与次级基准钟整体系统结构、物理工作机制、信号闭环控制原理及时序输出基本一致，二者核心差异仅在于量子参考体系的选择不同：其中基准钟以铯原子跃迁能级为量子频率参考，次级基准钟则采用铷原子量子体系。

两类原子钟在整机工作流程、频率输出模式、误差产生机理等关键层面具有高度相似性，频率稳定度、频率不确定度、运行率等核心性能参数的物理表征逻辑一致。因此，针对基准钟、次级基准钟各项性能表征指标的试验条件、测试流程、数据采集方式、计算模型及不确定度分析方法完全通用，无需分别制定差异化测试方案。

综上，考虑到两类设备测试方法互通、评价体系统一，同时为满足性能比对、系统误差溯源及测量不确定度全面评定的试验需求，本标准选取两台基准钟作为试验载体，统一完成基准钟与次级基准钟全项性能指标测试及不确定度评价工作，试验方案科学合理、具备充分适用性与代表性。

被测基准钟 1 和被测基准钟 2 的系统实物分别如图 1 和图 2 所示。



图 1 被测基准钟 1 的实物照片



图 2 被测基准钟 2 的实物照片

本测试环境温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，湿度为 $40\%\pm 10\%$ ，周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。本测试参测设备包括守时钟，即为向国际计量局报数的氢钟(BIPM 编号为 140821)。注：报数为每月一次，报送数据将参与产生国际原子时。

1.1、被测基准钟/次级基准钟性能表征参数测试结果

1.1.1 频率稳定度

根据标准文档 5.1.1 节所述，基准钟/次级基准钟性能表征中的频率稳定度测量方法包括两种。

1.1.1.1 被测基准钟/次级基准钟以守时钟作参考测量得到的频率稳定度

根据标准文档 5.4.1.1 节所述测试方法，我们对被测基准钟 1 的频率稳定度进行测量。测量过程中，以向国际计量局报数的氢钟(BIPM 编号为 140821)作为守时钟，其输出 100 MHz 标准频率信号接入被测基准钟 1。被测基准钟 1 在高密度原子云分布下运行，测量时间 1 个月，测量并计算得到被测基准钟 1 给出的氢钟的相对频率偏差 y_{out} (未修正系统频移项)。再将该相对频率偏差 y_{out} 代入阿伦标准偏差公式(本标准文档公式(1))计算得到阿伦标准偏差 $\sigma_{y1}(\tau)$ ，并得到频率稳定度曲线，如图 3 所示。

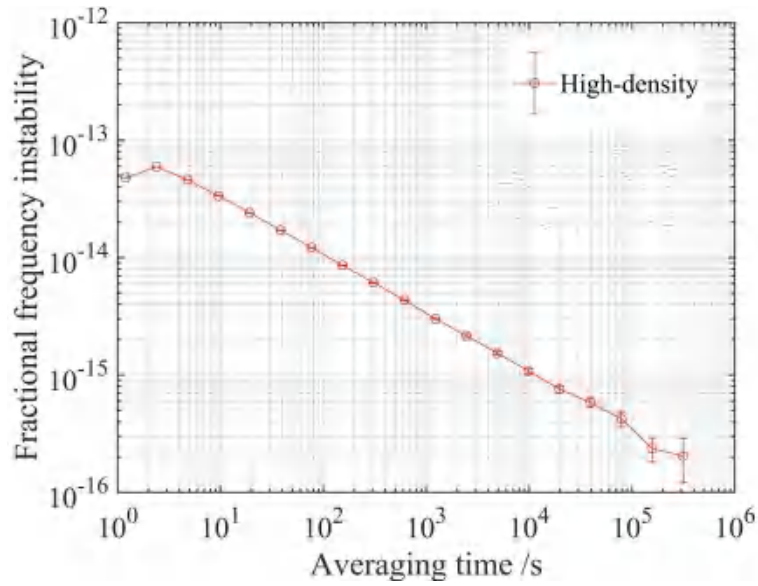


图 3 被测基准钟 1 以氢钟作参考测量得到的频率稳定度曲线

根据上述测量结果，得到被测基准钟 1 的频率稳定度如表 1 所示，其中秒稳（ $\tau=1\text{ s}$ ）通过曲线拟合与外推得到。

表 1 被测基准钟 1 以守时钟作参考测量得到的频率稳定度

取样时间（ τ ）	稳定度
1s	1.0×10^{-13}
10 s	3.2×10^{-14}
100 s	1.1×10^{-14}
1000 s	3.4×10^{-15}
10000 s	1.1×10^{-15}
1 d	4.0×10^{-16}

1.1.1.2 两台基准钟/次级基准钟之间的频率比对测量得到的频率稳定度

根据标准文档 5.4.1.2 节所述测试方法。测量过程中，以向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 140821）作为守时钟，被

测基准钟 1 和被测基准钟 2 以该同一台守时钟作为参考。两台被测基准钟均正常闭环锁定状态，连续运行在单一工作条件，并保持同步运行，测量时间 1 个月，测量并计算两台被测基准钟给出的守时钟的相对频率偏差 y_{P1} 和 y_{P2} （未修正系统频移项），得到虚拟拍频 $\Delta y = y_{P1} - y_{P2}$ 。再将虚拟拍频 Δy 代入阿伦标准偏差公式（标准文档公式（1））计算得到阿伦标准偏差 $\sigma_{12}(\tau)$ ，并得到频率稳定度曲线，如图 4 所示。

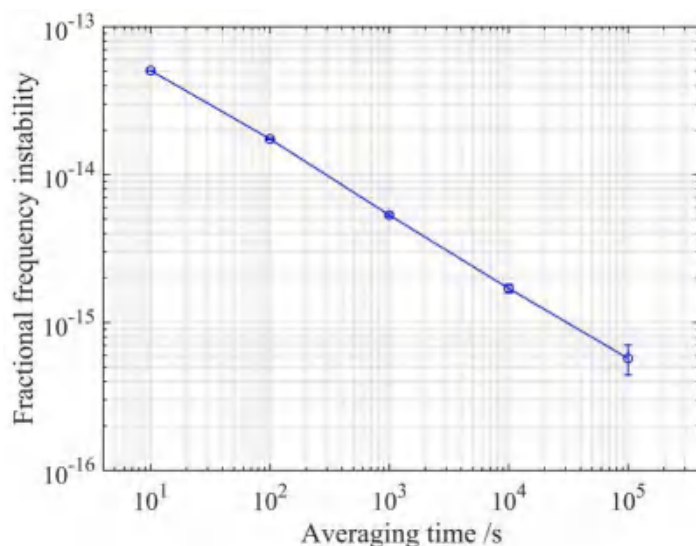


图 4 两台基准钟/次级基准钟之间的频率比对得到虚拟拍频，并得到频率稳定度曲线

被测基准钟 2 为国家秒长计量基准，其稳定运行，频率稳定度 $\sigma_{REF}(\tau)$ 已知。根据图 4 中的数据，按照标准文档公式（5），计算得到不同取样时间下被测基准钟 1 的频率稳定度如表 2 所示。

表 2 被测基准钟 1 和基准钟 2 共用守时钟频率参考，且被测基准钟 2 频率稳定度已知时，得到的被测基准钟 1 的频率稳定度

取样时间	稳定度
1 s	1.1×10^{-13}
10 s	3.4×10^{-14}
100 s	1.2×10^{-14}
1000 s	3.6×10^{-15}
10000 s	1.2×10^{-15}
1 d	4.2×10^{-16}

1.1.2 频率不确定度

1.1.2.1 A 类频率不确定度

根据标准文档 5.4.2.1 节所述测试方法，我们对被测基准钟 1 的 A 类频率不确定度进行测量。

标准文档 5.4.2.1 节第一种方法：测量过程中，以向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 140821）作为守时钟，被测基准钟 1 交替运行在高密度原子云和低密度原子云两种模式下，共运行 33 天（2024 年 6 月 2 日至 2024 年 7 月 4 日），得到高密度时原子数 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 ，参照附录 B.1 计算得到被测基准钟在零密度时的相对频率稳定度 $\sigma_z(\tau)$ ，见图 5 中黑色曲线所示；图 5 中红色和蓝色曲线分别为被测基准钟 1 在高密度和低密度运行时的相对频率稳定度。

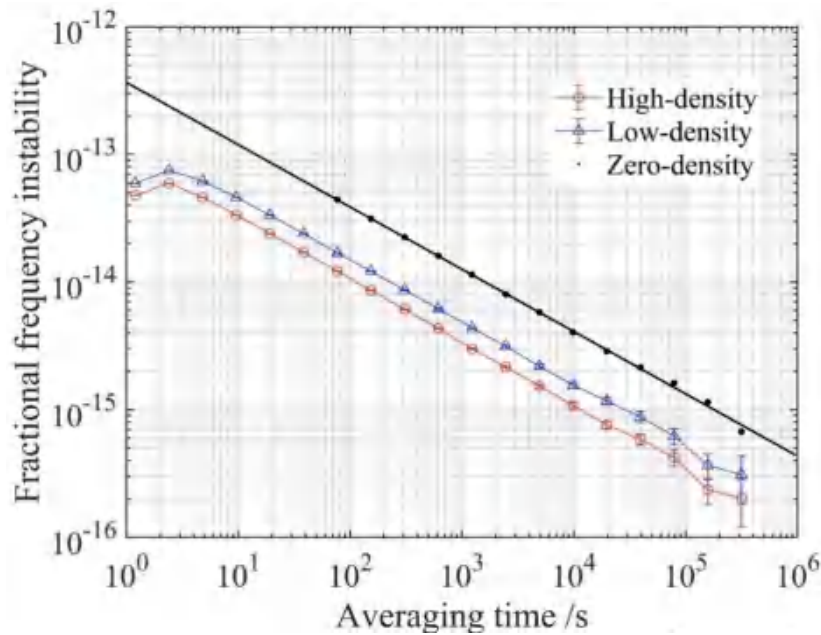


图 5 被测基准钟 1 给出的氢钟（BIPM 编号为 140821）的相对频率偏差计算得到的频率稳定度曲线。黑色曲线为被测基准钟 1 在零密度时的相对频率稳定度，红色和蓝色曲线分别为被测基准钟 1 在高密度和低密度运行时的相对频率稳定度

在得到被测基准钟 1 在零密度时的相对频率稳定度 $\sigma_z(\tau)$ 曲线后，获得天稳为 $\sigma_{1d}=1.26\times 10^{-15}$ 。 σ_{1d}/\sqrt{n} 就表示为被测基准钟 1 的 A 类相对频率不确定度 u_A 。测量时间 n 取为 30 天，被测基准钟 1 的 A 类相对频率不确定度 $u_A=2.3\times 10^{-16}$ 。

1.1.2.2 B 类频率不确定度

根据标准文档 5.4.2.2 节所述测试方法，我们对被测基准钟 1 的 B 类频率不确定度进行测量，其核心方法充分借鉴了国际时间频率咨询委员会（CCTF）基准工作组（WG.PFS）的评定建议。

说要说明的是，B 类不确定度需基于长时间连续自校准观测数据进行统计分析，或结合设备长期历史测量序列，并在评价阶段审阅、采信其长期自评定报告，完成统计计算与量化评估。

被测基准钟 1 放置在中国计量科学研究院昌平院区新时频大楼 D2 房间，测试地点海拔高度为 $78.9 \pm 0.2 \text{ m}$ ，测试温度为 $296.78 \text{ K} \pm 0.1\text{K}$ 。以向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 140821）作为守时钟，对被测基准钟 1 的不确定度进行综合评定，B 类频率不确定度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。该评定结果于 2025 年 5 月 27 日以题为“Uncertainty evaluation of the caesium fountain primary frequency standard NIM6”发表在国际权威期刊《Metrologia》上，其物理效应、频率修正量及其相对频率不确定度见表 3 中所示。

表 3. 被测基准钟 1 的 B 类频率不确定度。列出了物理效应、频率修正量，以及以 10^{-16} 为单位的 B 类相对不确定度

物理效应	频率修正量 / 10^{-16}	B 类相对不确定 度/ 10^{-16}
二阶塞曼	728.8	0.7
冷原子碰撞	0.0*	1.59
黑体辐射	-165.9	0.6

引力和二阶多普勒	86.52	0.2
微波透镜	0.63	0.5
微波干涉开关	0.0	1.0
微波泄漏	0.0	0.1
腔相位差	0.0	0.87
微波谱不纯	0.0	0.1
光频移	0.0	0.01
Majorana 跃迁	0.0	0.1
Rabi 和 Ramsey 牵引	0.0	0.1
腔牵引	0.0	0.02
背景气体碰撞	0.0	0.1
总不确定度	650.05	2.3

*碰撞位移在低密度下计算为 19.0×10^{-16} ，在高密度下计算为 44.3×10^{-16} 。

2025年4月29日至2025年5月28日，被测基准钟1给出的经系统频移修正后的氢钟（BIPM编号为140821）的相对频率偏差为 $y_{P0} = 218.3 \times 10^{-16}$ ，B类相对频率不确定度为 2.3×10^{-16} 。综上，测试结果见表4。

表4. 被测基准钟1的B类频率不确定度结果及测试环境参数

B类相对频率不确定度	2.3×10^{-16}
测试环境温度	296.78 K \pm 0.1K
测试地点海拔高度	78.9 \pm 0.2 m

1.1.3 运行率

根据标准文档 5.4.3 节所述测试方法，我们对被测基准钟 1 的运行率进行测量。测量过程中，以向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 140821）作为守时钟，被测基准钟 1 交替运行在 高密度原子云和低密度原子云两种模式下，共运行 30 天（2025 年 4 月 29 日-2025 年 5 月 28 日）。

被测基准钟 1 测量的总时长为 30 天，即 $T=30*86400\text{ s}=2592000\text{ s}$ 。测量期间，2025 年 5 月 11 日和 5 月 15 日激光器失锁，导致被测基准钟 1 无法正常给出复现秒定义的钟跃迁频率，合计 87430 s；除此之外，由于系统自身的电噪声等，系统运行期间出现频率跳变点（ $>0.005/9192631770$ ），导致被测基准钟 1 无法正常给出复现秒定义的钟跃迁频率，合计 938 s。综上所述，测量期间被测基准钟 1 能够正常给出复现秒定义的钟跃迁频率的时间 $t=2592000\text{ s}-87430\text{ s}-938\text{ s}=2503632\text{ s}$ ，依据标准文档公式（9），计算得到被测基准钟 1 的月运行率 $R=96.6\%$ 。

1.2、被测基准钟/次级基准钟不确定度评价测试结果

1.2.1 与秒长国家计量基准进行频率比对

根据标准文档 6.2 节所述测试方法，我们对被测基准钟 1 自评定得到的相对频率不确定度进行评价。测量评价过程中，被测基准钟 1 与秒长国家计量基准（中国计量科学研究院研制的 NIM5 铯原子喷泉钟）均以向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编

号为 140821) 作为守时钟, 2025 年 4 月 29 日-2025 年 5 月 28 日进行了 30 天的同步比对。

在此测量期间, 被测基准钟 1 交替运行在高密度和低密度原子云分布两种模式下, 按标准文档 5.4.2.1 和 5.4.2.2 方法评定, 得到其 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} 、经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差 y_{P0} 、被测基准钟 1 的实验室链路相对不确定度 $u_{P-link/lab}$ 见表 5 所示。该结果也可参见被测基准钟 1 向国际计量局报数文件(网址: https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/data/PSFS_reports/nim6_60794-60824.pdf)。

表 5. 2025 年 4 月 29 日至 2025 年 5 月 28 日被测基准钟 1 评测性能参数

y_{P0}	218.3×10^{-16}
u_{P-A}	2.3×10^{-16}
u_{P-B}	2.3×10^{-16}
$u_{P-link/lab}$	1.0×10^{-16}
R	96.6%

在此测量期间, 秒长国家计量基准也交替运行在高密度和低密度原子云分布两种模式下, 其 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} 、经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差 y_{P0} 、被测基准钟 1 的实验室链路相对不确定度 $u_{P-link/lab}$ 见表 6 所示。该结果也可参见秒长国家计量基准向国际计量局报数

文件(网址: https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/data/PSFS_reports/nim5_60794-60824.pdf)。

表 6. 2025 年 4 月 29 日至 2025 年 5 月 28 日秒长国家计量基准评测性能参数

y_{PFS}	227.6×10^{-16}
$u_{\text{PFS-A}}$	3.5×10^{-16}
$u_{\text{PFS-B}}$	6.8×10^{-16}
$u_{\text{PFS-link/lab}}$	1.0×10^{-16}
R	98.5%

根据表 5 和表 6 的评测数据, 依据标准文档公式 (10), 得到被测基准钟 1 与秒长国家计量基准测量得到的氢钟的相对频率偏差之差 Δy_{P} 为

$$|\Delta y_{\text{P}}| = |y_{\text{P0}} - y_{\text{PFS}}| = 218.3 \times 10^{-16} - 227.6 \times 10^{-16} = 9.3 \times 10^{-16}$$

被测基准钟 1 与秒长国家计量基准比对链路合成不确定度表示为

$$\sqrt{(u_{\text{P-A}})^2 + (u_{\text{P-B}})^2 + (u_{\text{P-link/lab}})^2 + (u_{\text{PFS-A}})^2 + (u_{\text{PFS-B}})^2 + (u_{\text{PFS-link/lab}})^2} = 8.4 \times 10^{-16}$$

综上, 相对频率偏差之差 Δy_{P} 满足标准文档公式 (11), 则判定被测基准钟 1 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。

2025 年 4 月 29 日至 2025 年 5 月 28 日被测基准钟 1 与秒长国家计量基准比对参数如表 7 所示。

表 7. 被测基准钟 1 与秒长国家计量基准比对参数

日期	MJD	y_{P0}	y_{PFS}	$y_{P0} - y_{PFS}$
2025/4/29	60794	2.08E-14	2.19E-14	-1.09E-15
2025/4/30	60795	2.16E-14	2.27E-14	-1.09E-15
2025/5/1	60796	2.14E-14	2.25E-14	-1.13E-15
2025/5/2	60797	2.09E-14	2.21E-14	-1.22E-15
2025/5/3	60798	2.11E-14	2.26E-14	-1.51E-15
2025/5/4	60799	2.10E-14	2.23E-14	-1.31E-15
2025/5/5	60800	2.08E-14	2.32E-14	-2.40E-15
2025/5/6	60801	2.21E-14	2.40E-14	-1.97E-15
2025/5/7	60802	2.11E-14	2.23E-14	-1.19E-15
2025/5/8	60803	2.15E-14	2.23E-14	-8.08E-16
2025/5/9	60804	2.19E-14	2.29E-14	-9.27E-16
2025/5/10	60805	2.24E-14	2.12E-14	1.16E-15
2025/5/11	60806	-	-	-
2025/5/12	60807	2.24E-14	2.22E-14	2.59E-16
2025/5/13	60808	2.22E-14	2.41E-14	-1.91E-15
2025/5/14	60809	2.15E-14	2.37E-14	-2.25E-15
2025/5/15	60810	2.23E-14	2.27E-14	-4.33E-16
2025/5/16	60811	2.16E-14	2.33E-14	-1.70E-15
2025/5/17	60812	2.24E-14	2.23E-14	7.00E-17
2025/5/18	60813	2.20E-14	2.26E-14	-5.58E-16
2025/5/19	60814	2.19E-14	2.27E-14	-7.99E-16
2025/5/20	60815	2.15E-14	2.20E-14	-4.56E-16

2025/5/21	60816	2.23E-14	2.32E-14	-9.47E-16
2025/5/22	60817	2.29E-14	2.35E-14	-5.94E-16
2025/5/23	60818	2.17E-14	2.31E-14	-1.33E-15
2025/5/24	60819	2.16E-14	2.24E-14	-8.28E-16
2025/5/25	60820	2.27E-14	2.32E-14	-5.75E-16
2025/5/26	60821	2.25E-14	2.28E-14	-2.99E-16
2025/5/27	60822	2.19E-14	2.26E-14	-7.05E-16
2025/5/28	60823	2.32E-14	2.35E-14	-3.42E-16
均值		2.18E-14	2.28E-14	-9.3E-16

1.2.2 与国际基准钟组进行频率比对

根据标准文档 6.3 节所述测试方法，我们对被测基准钟 1 自评定得到的相对频率不确定度进行评价。

测量评价过程中，被测基准钟 1 以向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 140821）作为守时钟，2025 年 4 月 29 日-2025 年 5 月 28 日与国际基准钟组进行了 30 天的同步比对。氢钟（BIPM 编号为 140821）与国际基准钟组间建立了比对链路，频率偏差传递链参数见表 8 所示，包括被测基准钟 1 给出的经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差 y_{P0} 、守时钟（TP）相对于 UTC（NIM）的相对频率偏差 $y_{TP-UTC(NIM)}$ 、UTC（NIM）相对于 UTC 的相对频率偏差 $y_{UTC(k)-UTC}$ 、UTC 相对于国际基准钟组（TT）的相对频率偏差 y_{UTC-TT} 以及被测基准钟 1 相对于国际基准钟组的相对频率偏差 y_{P-TT} 。其中， y_{P-TT} 依据本标准文档公式（12）计算得到。

上述数据来源参见 BIPM 网站公布的国际计量局在第 449 期国际时间频率公报（网址：<https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/Circular-T/cirt/cirt.449>）。

表 8. 频率偏差传递链参数（2025 年 4 月 29 日-2025 年 5 月 28 日）

y_{P0}	218.3×10^{-16}
$y_{TP-UTC(NIM)}$	-223.1×10^{-16}
$y_{UTC(NIM)-UTC}$	0.9×10^{-16}
y_{UTC-TT}	0.8×10^{-16}
y_{P-TT}	-3.1×10^{-16}

被测基准钟 1 与国际基准钟组比对链路合成不确定度见表 9 所示,包括被测基准钟 1 在 30 天内的 A 类相对频率不确定度 u_{P-A} 、被测基准钟 1 的 B 类相对频率不确定度 u_{P-B} 、被测基准钟 1 的实验室链路相对不确定度 $u_{P-link/lab}$ 、UTC(NIM)到 TAI 的链路相对不确定度 $u_{I/TAI}$ (BIPM 网站公布)以及国际基准钟组加权平均频率的相对不确定度 u_{TT} (BIPM 网站公布)。

表 9. 被测基准钟 1 与国际基准钟组比对链路合成不确定度（2025 年 4 月 29 日-2025 年 5 月 28 日）

u_{P-A}	2.3×10^{-16}
u_{P-B}	2.3×10^{-16}
$u_{P-link/lab}$	1.0×10^{-16}
$u_{I/TAI}$	1.7×10^{-16}

u_{TT}	1.4×10^{-16}
----------	-----------------------

根据表 8 中的数据，依据标准文档公式 (12)，得到被测基准钟 1 相对于国际基准钟组的相对频率偏差 y_{P-TT} 为

$$y_{P-TT} = y_{P0-TP} + y_{TP-UTC(k)} + y_{UTC(k)-UTC} + y_{UTC-TT} = -3.1 \times 10^{-16}$$

16

被测基准钟 1 与国际基准钟组比对链路合成不确定度表示为

$$\sqrt{(u_{P-A})^2 + (u_{P-B})^2 + (u_{P-link/lab})^2 + (u_{1/TAI})^2 + (u_{TT})^2} = 4.1 \times 10^{-16}$$

综上，被测基准钟 1 相对于国际基准钟组的相对频率偏差 y_{P-TT} 满足标准文档公式 (13)，则判定被测基准钟 1 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。

2025 年 4 月 29 日至 2025 年 5 月 28 日被测基准钟 1 与国际基准钟组比对参数如表 10 所示。

表 10. 被测基准钟 1 与秒长国家计量基准比对参数

日期	MJD	y_{P0-TP}	$y_{TP-UTC(NIM)}$	$y_{UTC(NIM)-U}$	y_{UTC-TT}
2025/4/29	60794	2.08E-14	-2.31E-14	2.31E-16	0.8E-16
2025/4/30	60795	2.16E-14	-2.08E-14		
2025/5/1	60796	2.14E-14	-2.31E-14		
2025/5/2	60797	2.09E-14	-1.97E-14		
2025/5/3	60798	2.11E-14	-2.20E-14		
2025/5/4	60799	2.10E-14	-2.31E-14	-9.26E-16	
2025/5/5	60800	2.08E-14	-1.97E-14		
2025/5/6	60801	2.21E-14	-1.85E-14		

2025/5/7	60802	2.11E-14	-2.08E-14		
2025/5/8	60803	2.15E-14	-2.20E-14		
2025/5/9	60804	2.19E-14	-2.20E-14	-2.31E-16	
2025/5/10	60805	2.24E-14	-2.08E-14		
2025/5/11	60806	-	-		
2025/5/12	60807	2.24E-14	-2.20E-14		
2025/5/13	60808	2.22E-14	-2.43E-14		
2025/5/14	60809	2.15E-14	-2.20E-14		
2025/5/15	60810	2.23E-14	-2.20E-14	4.63E-16	
2025/5/16	60811	2.16E-14	-2.43E-14		
2025/5/17	60812	2.24E-14	-2.31E-14		
2025/5/18	60813	2.20E-14	-9.37E-14		
2025/5/19	60814	2.19E-14	4.75E-14		
2025/5/20	60815	2.15E-14	-2.08E-14	4.63E-16	
2025/5/21	60816	2.23E-14	-2.31E-14		
2025/5/22	60817	2.29E-14	-2.31E-14		
2025/5/23	60818	2.17E-14	1.99E-13		
2025/5/24	60819	2.16E-14	-2.31E-14		
2025/5/25	60820	2.27E-14	-2.20E-14	4.63E-16	
2025/5/26	60821	2.25E-14	-2.44E-13		
2025/5/27	60822	2.19E-14	-2.31E-14		
2025/5/28	60823	2.32E-14	-2.66E-14		
均值		2.18E-	-2.23E-14		

2、被测冷原子微波守时钟

本标准选取的被测冷原子微波守时钟为铷原子喷泉钟，其输出 100 MHz 标准频率信号，其系统图如图 6 所示。

被测冷原子微波守时钟性能表征参数主要包括频率稳定度、相对频率偏差、频率复现性、频率漂移率和相位噪声。



图 6 被测冷原子微波守时钟的实物照片

2.1 被测冷原子微波守时钟性能表征参数测试结果

2.1.1 频率稳定度

根据标准文档 7.1.1 中 7.4.1.1 节所述测试方法，对被测冷原子微波守时钟的频率稳定度进行测试。参考频标采用向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 140821），其输出 100 MHz 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。2026 年 3 月 31 日至 2026 年 4 月 19 日，频标比对器自动记录被测冷原子微波守时钟相对于氢钟的相对频率偏差 Y_{1r} ，如图 7 所示，取样时间为 1 s。将相对频率偏差 Y_{1r} 代入本标准文档公式（1），得到频率稳定度曲线 $\sigma_{y_{1r}}(\tau)$ ，如图 8 所示。

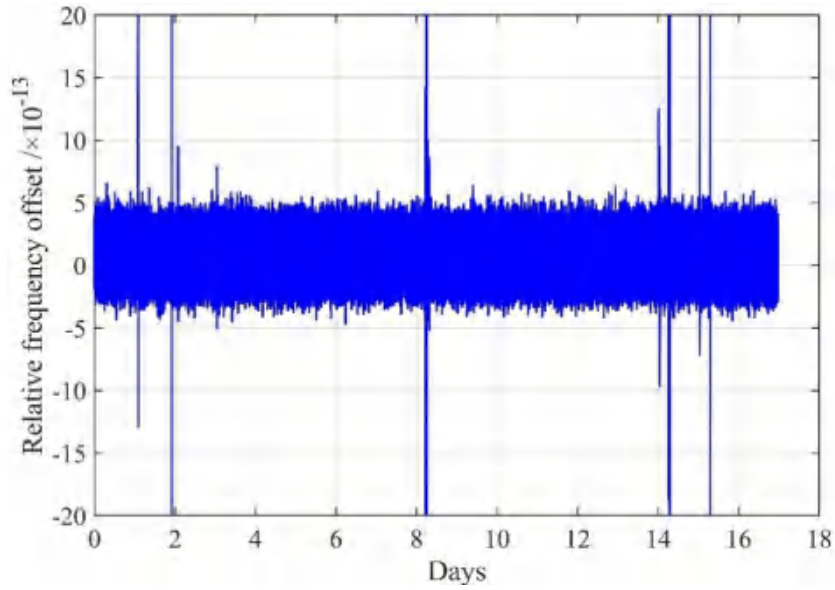


图 7. 2026 年 3 月 31 日至 2026 年 4 月 19 日，测量得到的被测冷原子微波守时钟相对于氢钟的相对频率偏差 Y_{1r}

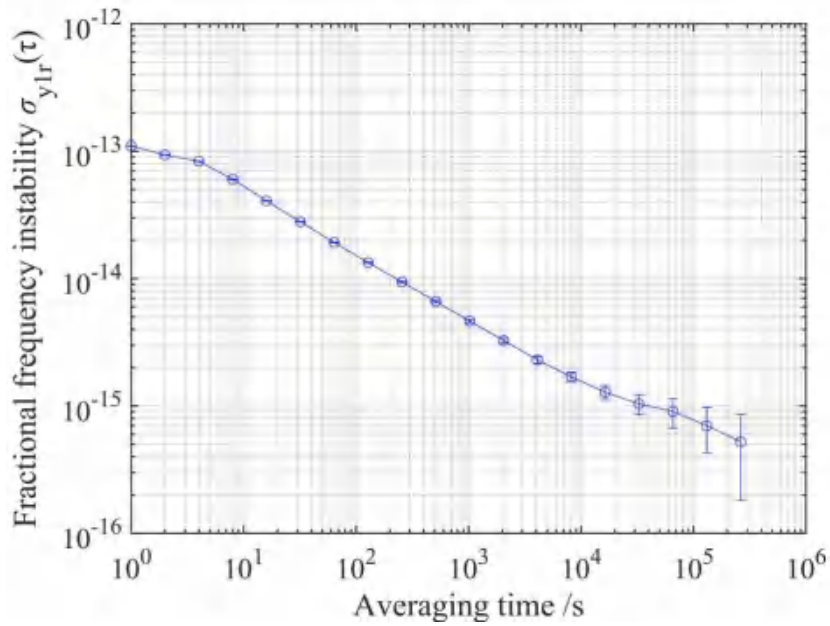


图 8. 相对频率偏差 Y_{1r} 得到频率稳定度曲线 $\sigma_{y1r}(\tau)$

氢钟的频率稳定度已知，根据本标准文档公式（15），得到被测冷原子微波守时钟在不同取样时间下的频率稳定度如表 11 所示。

表 11. 被测冷原子微波守时钟在不同取样时间下的频率稳定度

取样时间	稳定度
1 s	1.3×10^{-13}
10 s	4.8×10^{-14}
100 s	1.5×10^{-14}
1000 s	4.2×10^{-15}
10000 s	1.5×10^{-15}
1 d	7.8×10^{-16}

2.1.2 相对频率偏差

根据标准文档 7.4.2 节所述测试方法，对被测冷原子微波守时钟的频率稳定度进行测试。参考频标采用向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 140821），其输出 100 MHz 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，参考频标链接到秒长国家计量基准。

2026 年 3 月 26 日至 2026 年 4 月 19 日，以取样时间 $\tau=1$ d 连续测量，根据频标比对器的测量数据，得到第 i 个取样周期内被测冷原子微波守时钟相对于氢钟的平均相对频率偏差 $Y_{1ri}(\tau)$ ，共测得 24 组数据；同取样时刻、同取样时间，秒长国家计量基准测量得到第 i 个取样周期内参考频标相对于复现秒定义的钟跃迁频率的平均相对频率偏差 $Y_{rpi}(\tau)$ ，共测得 24 组数据；平均相对频率偏差 $Y_{1ri}(\tau)$ 和 $Y_{rpi}(\tau)$ 的测量数据如表 12 所示。

表 12. 被测冷原子微波守时钟和秒长国家计量基准得到取样周期内
氢钟的平均相对频率偏差 $Y_{1ri}(\tau)$ 和 $Y_{rpi}(\tau)$, 取样时间 $\tau=1$ d

测量时间	$Y_{1ri}(\tau)$	$Y_{rpi}(\tau)$	$Y_i(\tau)$
2026/3/26	8.020E-14	-3.866E-14	4.154E-14
2026/3/27	8.050E-14	-3.903E-14	4.147E-14
2026/3/28	7.889E-14	-3.782E-14	4.107E-14
2026/3/29	7.885E-14	-4.008E-14	3.877E-14
2026/3/30	8.067E-14	-3.783E-14	4.285E-14
2026/3/31	7.816E-14	-3.846E-14	3.970E-14
2026/4/1	7.741E-14	-3.838E-14	3.903E-14
2026/4/2	7.684E-14	-3.838E-14	3.846E-14
2026/4/3	7.682E-14	-3.737E-14	3.945E-14
2026/4/4	7.633E-14	-3.670E-14	3.963E-14
2026/4/5	7.729E-14	-3.968E-14	3.761E-14
2026/4/6	7.744E-14	-3.755E-14	3.989E-14
2026/4/7	7.613E-14	-	-
2026/4/8	7.612E-14	-3.952E-14	3.660E-14
2026/4/9	7.531E-14	-3.892E-14	3.639E-14
2026/4/10	7.748E-14	-3.857E-14	3.891E-14
2026/4/11	7.638E-14	-3.875E-14	3.762E-14
2026/4/12	7.599E-14	-3.921E-14	3.678E-14
2026/4/13	7.641E-14	-3.733E-14	3.908E-14
2026/4/14	7.891E-14	-3.896E-14	3.995E-14
2026/4/15	7.715E-14	-3.929E-14	3.786E-14

2026/4/16	7.816E-14	-3.843E-14	3.972E-14
2026/4/17	7.915E-14	-3.876E-14	4.039E-14
2026/4/18	7.726E-14	-3.874E-14	3.852E-14
2026/4/19	7.740E-14	-3.901E-14	3.839E-14

被测冷原子微波守时钟和秒长国家计量基准所在位置的高度之差为 0 m，根据本标准文档公式 (21)，得到被测冷原子微波守时钟输出频率的相对频率偏差 Y 为 $3.92E-14$ 。

根据本标准文档公式 (23) ~ 公式 (25)，得到被测冷原子微波守时钟的相对频率偏差测量的不确定度见表 13，得到总合成标准不确定度为 $1.8E-15$ 。

表 13. 被测冷原子微波守时钟相对频率偏差测量不确定度

效应	相对不确定度
被测冷原子微波守时钟测量过程的统计不确定度 u_s	1.61E-15
秒长国家计量基准的 B 类相对频率不确定度 u_{PFS-B}	6.8E-16
测量系统不确定度 u_M	1.0E-16

2.1.3 频率复现性

根据标准文档 7.4.3 节所述测试方法，对被测冷原子微波守时钟的频率复现性进行测试。测量时间为 2026 年 3 月 17 日至 2026 年 4 月 2 日，其中 2026 年 3 月 25 日被测冷原子守时钟关机 24 小时，用于维持其物理系统真空度的真空泵可保持运行。

测量数据见表 14 所示，相对频率偏差 Y_1 和 Y_2 分别为 $3.95\text{E-}14$ 和 $4.04\text{E-}14$ ，根据本标准文档公式 (26) 计算得到频率复现性 $R=9.0\text{E-}16$ 。

表 14. 被测冷原子微波守时钟频率复现性测量数据

测量时间	相对频率偏差	频率复现性 R
2026/3/17-2026/3/25	$Y_1=3.95\text{E-}14$	9.0E-16
2026/3/25-2026/4/02	$Y_2=4.04\text{E-}14$	

2.1.4 频率漂移率

根据标准文档 7.4.4 节所述测试方法，对被测冷原子微波守时钟的频率漂移率进行测试。2026 年 3 月 26 日至 2026 年 4 月 19 日，以取样时间 $\tau=1\text{ d}$ 连续测量，得到被测冷原子微波守时钟相对于复现秒定义的钟跃迁频率的平均相对频率偏差 $Y_i(\tau)$ ，共 24 组，见表 12 中所示。

根据本标准文档公式 (27)，计算得到被测冷原子微波守时钟的日频率漂移率为 -1.05×10^{-16} ，频率变化曲线如图 9 所示。

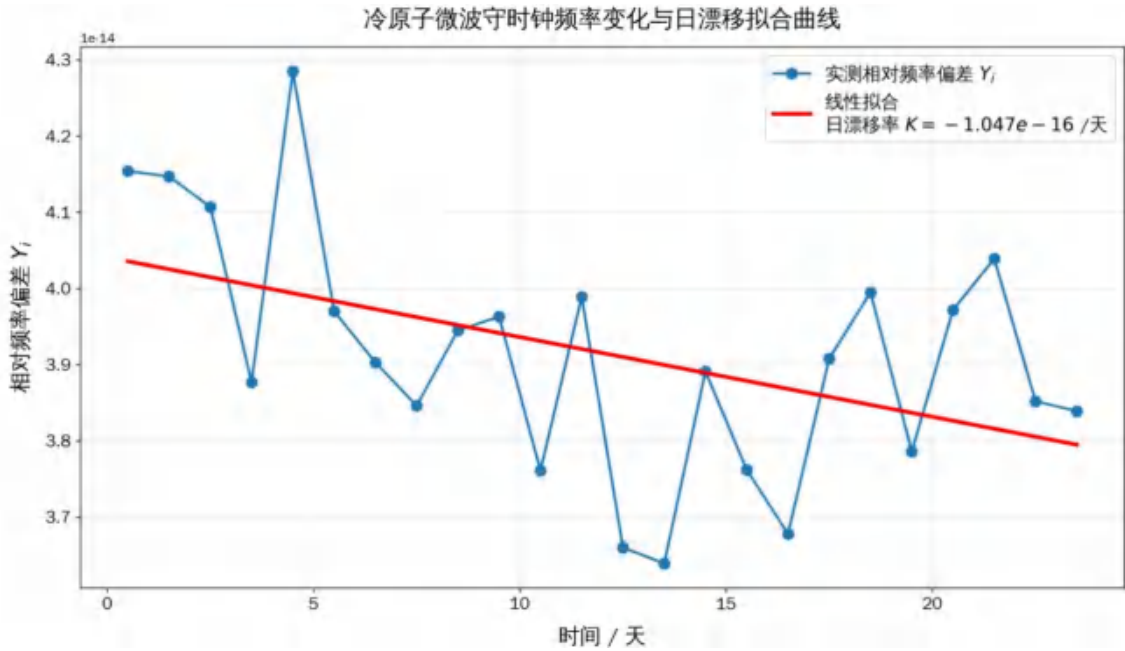


图 9. 被测冷原子微波守时钟频率变化曲线与日频率漂移率曲线

2.1.5 相位噪声

根据标准文档 7.4.5 节所述测试方法，对被测冷原子微波守时钟的相位噪声进行测试。参考频标采用向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 140821），其输出 100 MHz 信号，其信号分成两路，一路作为相位噪声测量装置（5125A 相噪测试仪）的参考，另外一路作为相位噪声测量装置的测量参考信号。被测冷原子微波守时钟的输出 100MHz 频率信号连接至相位噪声测量装置，作为测量信号。

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，得到相位噪声随傅立叶分析频率完整的测试曲线如图 10 所示。被测冷原子微波守时钟在不同偏移频率处的相位噪声值见表 15 所示。

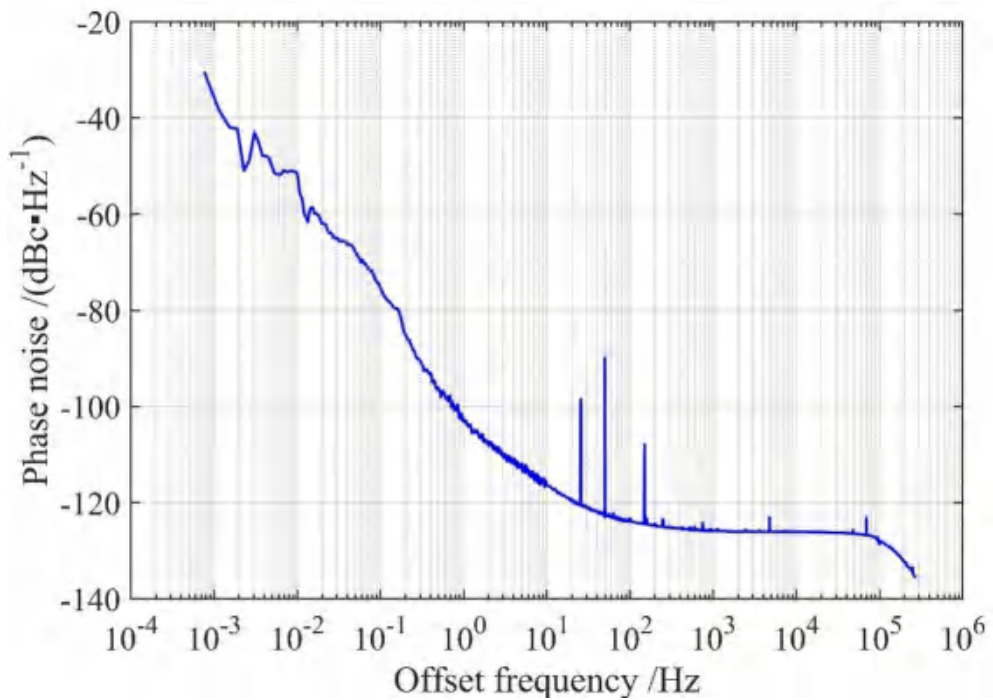


图 10. 被测冷原子微波守时钟相位噪声随傅立叶分析频率完整的测试曲线

表 15. 被测冷原子微波守时钟在不同傅立叶频率处的相位噪声

傅立叶频率	相位噪声/ dBc·Hz ⁻¹
1 Hz	-102.6~ -102.8
10 Hz	-116.2~ -116.4
100 Hz	-123.3~ -123.5
1 kHz	-125.8~ -125.9
10 kHz	-126.0~ -126.1
100 kHz	-128.4~ -128.5

附件 2

《冷原子微波钟性能表征及测量方法》

实验测试报告 2

1、被测基准钟

测试组选择一台铯原子喷泉钟，如图 1 所示，用于基准钟/次级基准钟性能指标测试，及其不确定度评价任务。本测试环境温度温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，湿度为 $45\% \pm 10\%$ ，周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动；平均海拔高度为 $(108 \pm 1)\text{ m}$ 。本测试参测设备包括守时钟，为向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 1404850）。



图 1. 被测基准钟实物系统

1.1、被测基准钟性能表征参数测试结果

1.1.1 频率稳定度

根据标准文档 5.4.1.1 节所述测试方法，对被测基准钟的频率稳定度进行测量。测量过程中，以编号为 1404850 的氢钟作为守时钟，其输出 100 MHz 标准频率信号接入被测基准钟。被测基准钟在单一条件（高密度原子云分布）下连续运行，测量时间 11 天，测量并计算得到被测基准钟给出的氢钟的相对频率偏差 y_{out} （未修正系统频移项），如图 2 所示（前 5.5 天）。再将该相对频率偏差 y_{out} 代入阿伦标准偏差公式（标准文档公式（1））计算得到阿伦标准偏差 $\sigma_{y1}(\tau)$ ，并得到频率稳定度曲线，如图 3 所示。

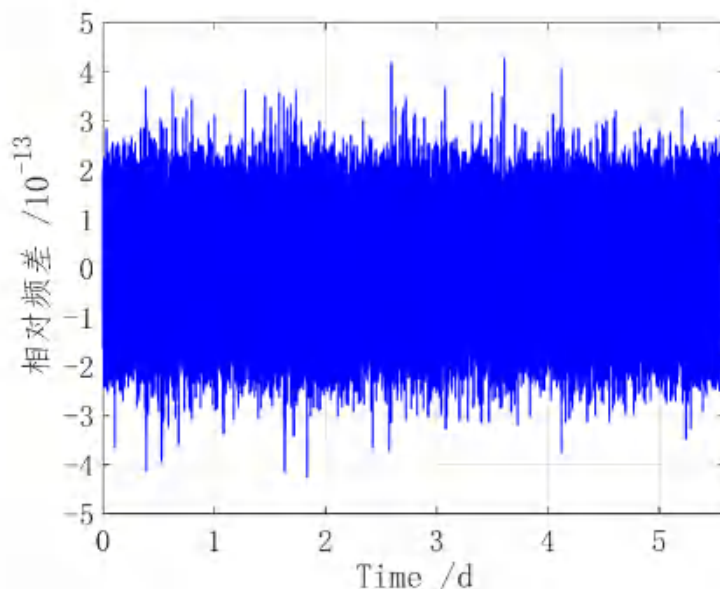


图 2 被测基准钟给出的氢钟的相对频率偏差 y_{out}

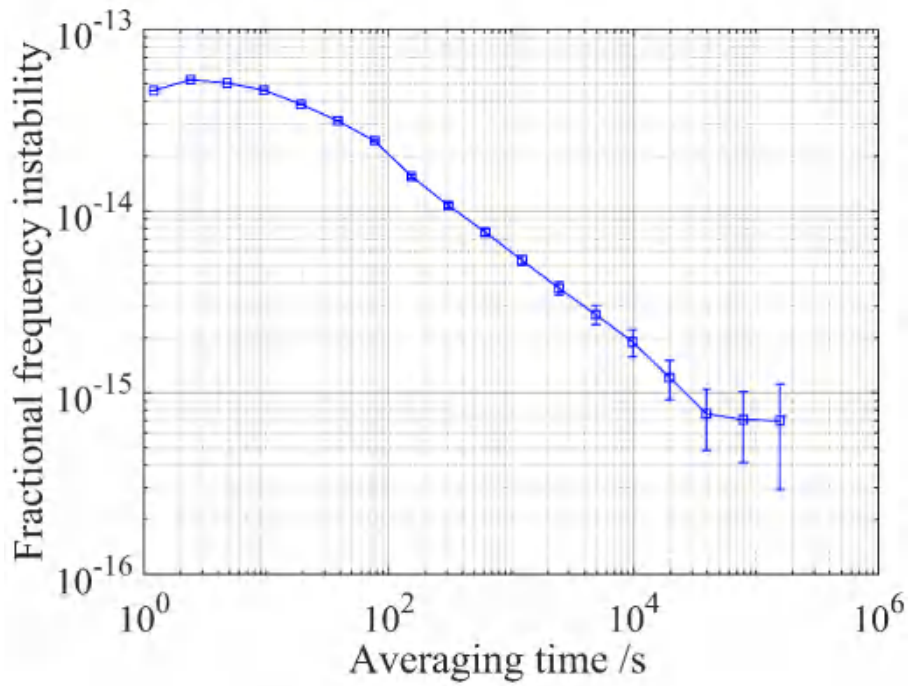


图 3 被测基准钟以氢钟作参考测量得到的频率稳定度曲线

根据上述测量结果, 得到被测基准钟的频率稳定度如表 1 所示, 其中秒稳 ($\tau=1\text{ s}$) 通过曲线拟合与外推得到。

表 1 被测基准钟以守时钟作参考测量得到的频率稳定度

取样时间 (τ)	稳定度
1s	1.9×10^{-13}
10 s	6.1×10^{-14}
100 s	2.0×10^{-14}
1000 s	5.9×10^{-15}
10000 s	1.8×10^{-15}

1.1.2 频率不确定度

1.1.2.1 A 类频率不确定度

根据标准文档 5.4.2.1 节所述测试方法，我们对被测基准钟 1 的 A 类频率不确定度进行测量。

标准文档 5.4.2.1 节第二种方法：被测基准钟的冷原子碰撞频移系数 $k=2.2E-17$ 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 15 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} ，参照附录 B.2 计算得到被测基准钟在零密度时的相对频率稳定度 $\sigma_Z(\tau)$ ，得到天稳为 $\sigma_{1d}=1.47\times 10^{-15}$ 。 σ_{1d}/\sqrt{n} 就表示为被测基准钟的 A 类相对频率不确定度 u_A 。测量时间 n 取为 15 天，被测基准钟 1 的 A 类相对频率不确定度 $u_A=3.8\times 10^{-16}$ 。

注：测量时间内，单一密度时原子数 N_{P-S} 、守时钟的相对频率偏差 y_{P-S} 以及零密度下的相对频率偏差 y_{Z1} 的天平均数据如表 2 所示。

表 2. 被测基准钟得到的守时钟的相对频率偏差、单一密度时原子数和零密度下的相对频率偏差的天平均数据

测量天数列	y_{P-S}	N_{P-S}	y_{Z1}
1	1.4779E-13	169.18	1.5150E-13
2	1.4985E-13	168.98	1.5356E-13
3	1.4832E-13	169.32	1.5204E-13
4	1.4644E-13	169.97	1.5017E-13
5	1.4863E-13	169.53	1.5236E-13
6	1.4998E-13	171.64	1.5375E-13
7	1.4880E-13	171.63	1.5257E-13

8	1.4961E-13	170.01	1.5334E-13
9	1.5027E-13	170.09	1.5401E-13
10	1.4962E-13	169.43	1.5334E-13
11	1.5095E-13	168.85	1.5466E-13
12	1.4962E-13	170.50	1.5336E-13
13	1.5031E-13	169.32	1.5403E-13
14	1.4896E-13	169.81	1.5269E-13
15	1.4754E-13	168.25	1.5123E-13

1.1.2.2 B 类频率不确定度

根据标准文档 5.4.2.2 节所述测试方法，对被测基准钟的 B 类频率不确定度进行测量，其核心方法充分借鉴了国际时间频率咨询委员会（CCTF）基准工作组（WG.PFS）的评定建议。

测试地点海拔高度为 108.9 ± 1.0 m，测试温度为 $295.5 \text{ K} \pm 0.3\text{K}$ 。以向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 1404850）作为守时钟，对被测基准钟的不确定度进行综合评定，B 类频率不确定度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，物理效应、频率修正量及其相对频率不确定度见表 3 中所示，其中微波腔相位差、微波泄漏、微波干涉开关和微波谱不纯引进的频移表示为微波功率相关频移。

表 3. 被测基准钟系统 B 类不确定度

偏差源	频率偏差 (10^{-15})	不确定度 (10^{-16})
-----	---------------------	---------------------

二级塞曼效应	72.66	0.3
碰撞频移	0.63	0.5
微波功率相关频移	0	6.0
黑体辐射	-16.33	0.7
引力红移	11.77	1.1
光频移	0	< 0.2
合成	68.73	6.2

在 15 天测量时间内，被测基准钟给出的经系统频移修正后的氢钟 (BIPM 编号为 1404850) 的相对频率偏差为 $y_{P0}=935.8 \times 10^{-16}$ ，B 类相对频率不确定度为 6.2×10^{-16} 。

表 4. 经系统频移修正后的零密度下的相对频率偏差

测量天数列	y_P	y_{P0}
1	1.5150E-13	1.2169E-13
2	1.5356E-13	9.1475E-14
3	1.5204E-13	9.0747E-14
4	1.5017E-13	8.9299E-14
5	1.5236E-13	9.1087E-14
6	1.5375E-13	9.2347E-14
7	1.5257E-13	9.0960E-14
8	1.5334E-13	9.2309E-14
9	1.5401E-13	9.2043E-14
10	1.5334E-13	9.1686E-14
11	1.5466E-13	9.1892E-14
12	1.5336E-13	9.1567E-14

13	1.5403E-13	9.3087E-14
14	1.5269E-13	9.2851E-14
15	1.5123E-13	9.0680E-14
均值	1.5284E-13	9.3582E-14

1.1.3 运行率

根据标准文档 5.4.3 节所述测试方法，对被测基准钟的运行率进行测量。测量过程中，以向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 1404850）作为守时钟，被测基准钟运行在单一原子云密度模式下，共运行 11 天。

运行期间，被测基准钟的每一发运行周期约为 1.2s，11 天共采集得到 $n_{\text{总}}=801217$ 个频差数据点，得到其标准差 $\sigma=0.00067$ 。在此期间，被测基准钟控制系统共剔除无效数据 $n_{\text{无效}}=3$ 。在被测基准钟运行过程中，偶尔产生的某些不应有的反常因素造成的测量频差数值超出正常值，我们按照 3σ 剔除粗大误差，最终剔除粗大误差后的有效数据点数 $n_{\text{有效}}=801074$ ，最终得到被测基准钟 11 天无故障运行率优于 $R=t/T \times 100\% = n_{\text{有效}} / (n_{\text{总}} + n_{\text{无效}}) \times 100\% = 99.98\%$ 。

1.2、被测基准钟/次级基准钟不确定度评价测试结果

1.2.1 与秒长国家计量基准进行频率比对

根据标准文档 6.2 节所述测试方法，我们对被测基准钟自评定得到的相对频率不确定度进行评价。测量评价过程中，被测基

准钟 1 与秒长国家计量基准（中国计量科学研究院研制的 NIM5 铯原子喷泉钟）均以向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 1404850）作为守时钟，进行了 11 天的同步比对。

在此测量期间，被测基准钟运行在单一原子云密度模式下，按标准文档 5.4.2.1 和 5.4.2.2 方法评定，得到其 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} 、经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差 y_{P0} 、被测基准钟 1 的实验室链路相对不确定度 $u_{P-link/lab}$ 如表 5 所示。

表 5.被测基准钟评测性能参数

y_{P0}	687.0×10^{-16}
u_{P-A}	4.4×10^{-16}
u_{P-B}	6.2×10^{-16}
$u_{P-link/lab}$	1.0×10^{-16}
R	99.98%

在此测量期间，秒长国家计量基准也交替运行在高密度和低密度原子云分布两种模式下，其 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} 、经系统频移修正后的守时钟的相对频率偏差 y_{P0} 、被测基准钟的实验室链路相对不确定度 $u_{P-link/lab}$ 如表 6 所示。

表 6.秒长国家计量基准评测性能参数

y_{PFS}	689.1×10^{-16}
u_{PFS-A}	5.8×10^{-16}

$u_{\text{PFS-B}}$	6.8×10^{-16}
$u_{\text{PFS-link/lab}}$	1.0×10^{-16}
R	99.5%

根据表 5 和表 6 的评测数据，依据标准文档公式 (10)，得到被测基准钟与秒长国家计量基准测量得到的氢钟的相对频率偏差之差 Δy_{P} 为

$$|\Delta y_{\text{P}}| = |y_{\text{P0}} - y_{\text{PFS}}| = 687.0 \times 10^{-16} - 689.1 \times 10^{-16} = 2.1 \times 10^{-16}$$

被测基准钟与秒长国家计量基准比对链路合成不确定度表示为

$$\sqrt{(u_{\text{P-A}})^2 + (u_{\text{P-B}})^2 + (u_{\text{P-link/lab}})^2 + (u_{\text{PFS-A}})^2 + (u_{\text{PFS-B}})^2 + (u_{\text{PFS-link/lab}})^2} = 11.8 \times 10^{-16}$$

综上，相对频率偏差之差 Δy_{P} 满足本标准文档公式 (11)，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。

注：11 天比测期间，被测基准钟与秒长国家计量基准比对参数如表 7 所示。

表 7. 被测基准钟与秒长国家计量基准比对参数

测量天数列	y_{P0}	y_{PFS}	$y_{\text{P0}} - y_{\text{PFS}}$
1	-6.87E-14	-6.77E-14	-1.0E-15
2	-6.82E-14	-6.92E-14	1.0E-15
3	-6.92E-14	-6.86E-14	-6.0E-16
4	-6.94E-14	-7.04E-14	1.0E-15
5	-6.92E-14	-6.99E-14	7.0E-16
6	-6.92E-14	-6.94E-14	2.0E-16
7	-6.83E-14	-6.78E-14	-5.0E-16

8	-6.74E-14	-6.81E-14	7.0E-16
9	-6.81E-14	-6.86E-14	5.0E-16
10	-6.98E-14	-6.91E-14	-7.0E-16
11	-6.86E-14	-6.86E-14	0.0E+00
均值	-6.87E-14	-6.89E-14	2.1E-16

2、被测冷原子微波守时钟

测试组选择 3 台冷原子微波守时钟，其中被测冷原子微波守时钟 1 输出 5 MHz 标准频率信号，被测冷原子微波守时钟 2 和被测冷原子微波守时钟 3 均输出 100 MHz 标准频率信号。

本测试环境温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，湿度为 $45\% \pm 10\%$ ，周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。本测试参测设备包括氢钟（秒稳优于 $6\text{E-}14$ ）和频标比对器（型号 5125A，Symmetricom）。

2.1 被测冷原子微波守时钟性能表征参数测试结果

2.1.1 频率稳定度

2.1.1.1 两台同种冷原子微波守时钟直接拍频的频率稳定度

根据标准文档 7.4.1.2 节所述测试方法，对被测冷原子微波守时钟 1 和被测冷原子微波守时钟 2 的频率稳定度进行测试。氢钟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 输出的 5 MHz 标准频率信号和被测冷原子微波守时钟 2 输出的 100 MHz 标准频率信号分别接入频标比对器。

2026 年 1 月 21 日至 2026 年 1 月 23 日，频标比对器自动记

录被测冷原子微波守时钟 1 相对于被测冷原子微波守时钟 2 的相对频率偏差 Y_{12} ，如图 4 所示。

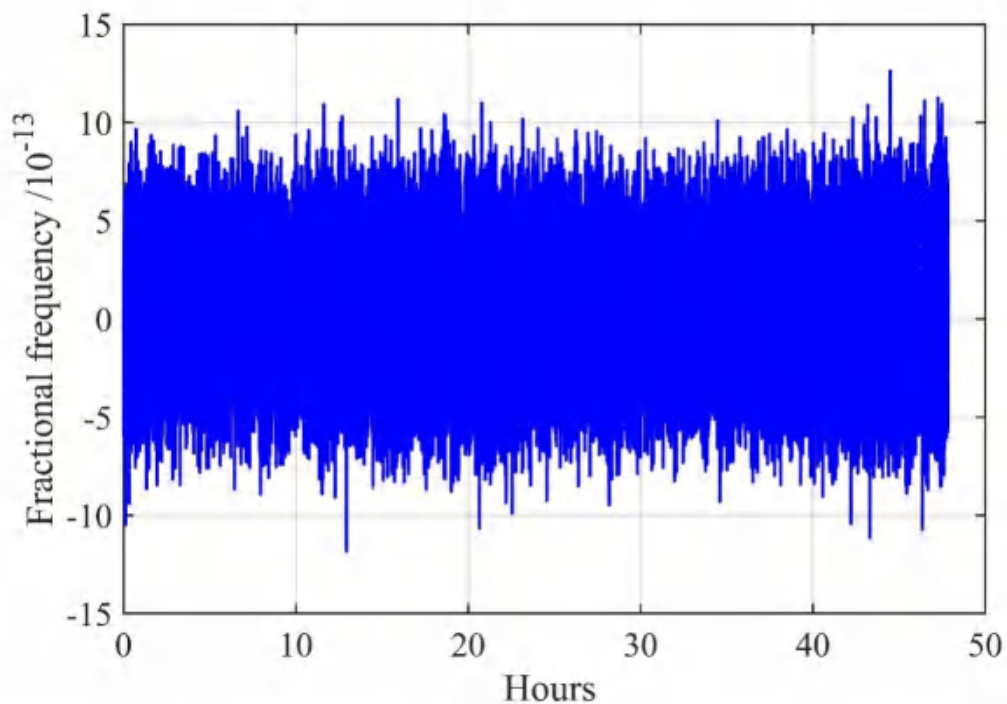


图 4. 2026 年 1 月 21 日至 2026 年 1 月 23 日，测量得到的被测冷原子微波守时钟 1 相对于被测冷原子微波守时钟 2 的相对频率偏差 Y_{12} ；采样时间 1s。

将相对频率偏差 Y_{12} 代入本标准文档公式 (1)，得到频率稳定度曲线 $\sigma_{y_{12}}(\tau)$ ，如图 5 所示。

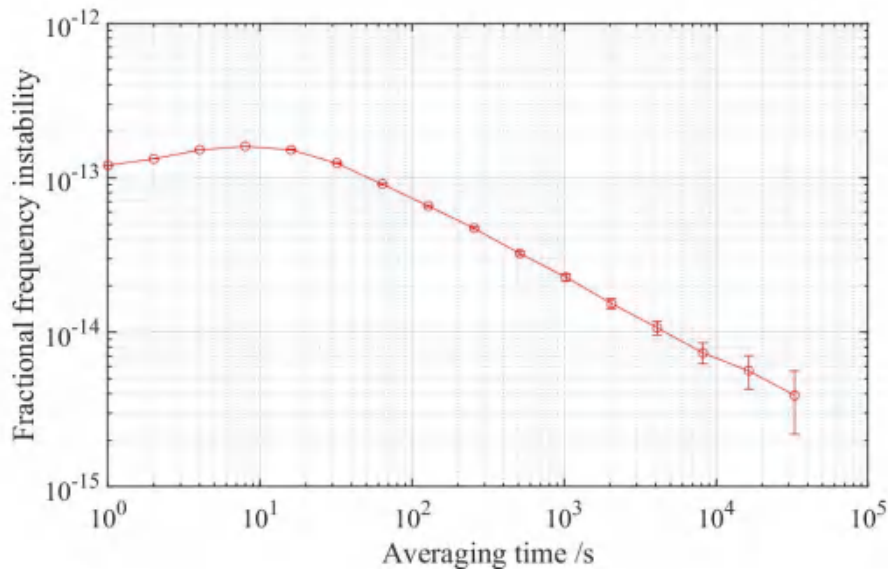


图 5. 相对频率偏差 Y_{12} 得到频率稳定度曲线 $\sigma_{y_{12}}(\tau)$

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依据本标准文档公式（18）计算得到，如表 8 所示。

表 8. 被测冷原子微波守时钟在不同取样时间下的频率稳定度

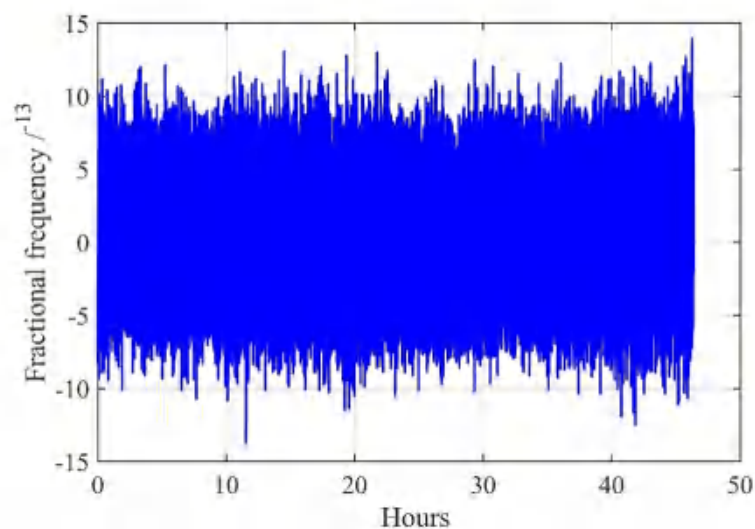
取样时间	稳定度
1s	4.45E-13
10 s	1.56E-13
100 s	5.16E-14
1000 s	1.63E-14
10000 s	4.81E-15

2.1.1.2 三台冷原子微波守时钟互相拍频的频率稳定度

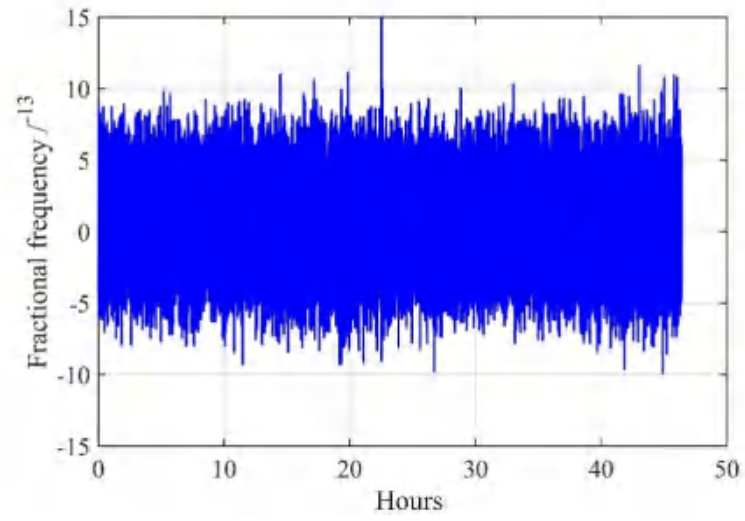
根据标准文档 7.4.1.3 节所述测试方法，对被测冷原子微波守时钟 1、被测冷原子微波守时钟 2 和被测冷原子微波守时钟 2 的频率稳定度进行测试。

氢钟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的输出信号分别功分两路，通过三台频标比对器实现两两之间的同步拍频比对。频标比对器 1 记录被测冷原子微波守时钟 1 与被测冷原子微波守时钟 2 之间的相对频率偏差 Y_{12} ，频标比对器 2 记录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} ，以及频标比对器 3 记录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} 。

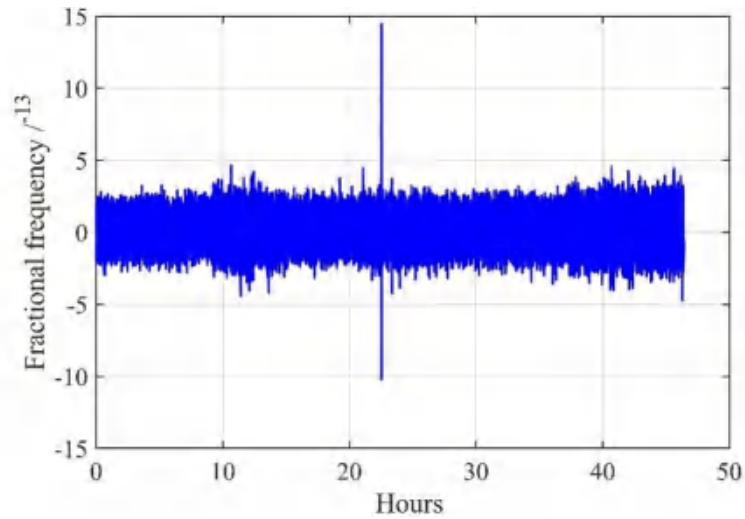
2026 年 1 月 23 日至 2026 年 1 月 25 日，频标比对器记录的相对频率偏差 Y_{12} 、 Y_{13} 、 Y_{23} 如图 6 所示。



(a)



(b)



(c)

图 6. 2026 年 1 月 23 日至 2026 年 1 月 25 日，测量得到的相对频率偏差。（a）被测冷原子微波守时钟 1 相对于被测冷原子微波守时钟 2 的相对频率偏差 Y_{12} ；（b）被测冷原子微波守时钟 1 相对于被测冷原子微波守时钟 3 的相对频率偏差 Y_{13} ；（c）被测冷原子微波守时钟 2 相对于被测冷原子微波守时钟 3 的相对频率偏差 Y_{23} ；采样时间 1s。

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，计算得到 $\sigma_{12}(\tau)$ 、 $\sigma_{13}(\tau)$ 和 $\sigma_{23}(\tau)$ ，见表 9 所示。

表 9. 计算得到的 $\sigma_{12}(\tau)$ 、 $\sigma_{13}(\tau)$ 和 $\sigma_{23}(\tau)$

取样时间	$\sigma_{12}(\tau)$	$\sigma_{13}(\tau)$	$\sigma_{23}(\tau)$
1s	7.38E-13	7.32E-13	2.10E-13
10 s	2.34E-13	2.37E-13	6.22E-14
100 s	7.43E-14	7.39E-14	2.22E-14
1000 s	2.39E-14	2.36E-14	6.31E-15
10000 s	7.48E-15	7.43E-15	2.32E-15

根据本标准文档公式 (19)，计算得到被测冷原子微波守时钟 1、被测冷原子微波守时钟 2 和被测冷原子微波守时钟 3 的频率稳定度 $\sigma_1(\tau)$ 、 $\sigma_2(\tau)$ 和 $\sigma_3(\tau)$ 见表 10 所示。

表 10. 被测冷原子微波守时钟 1、2 和 3 的频率稳定度 $\sigma_1(\tau)$ 、 $\sigma_2(\tau)$ 和 $\sigma_3(\tau)$

取样时间	$\sigma_1(\tau)$	$\sigma_2(\tau)$	$\sigma_3(\tau)$
1s	7.20E-13	1.63E-13	1.33E-13
10 s	2.31E-13	3.50E-14	5.14E-14
100 s	7.24E-14	1.66E-14	1.47E-14
1000 s	2.33E-14	5.20E-15	3.58E-15
10000 s	7.27E-15	1.75E-15	1.52E-15

附件 3

《冷原子微波钟性能表征及测量方法》

实验测试报告 3

1、被测冷原子微波守时钟

测试组选择一台冷原子微波守时钟，输出 10 MHz 标准频率信号，如图 1 所示，用于冷原子微波守时钟性能表征参数测试。



图 1 被测冷原子微波守时钟实物

本测试环境温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，湿度为 $40\% \pm 10\%$ ，周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动；平均海拔高度为 $(78.9 \pm 0.5)\text{ m}$ 。本测试参测设备包括氢钟（向国际计量局报数的氢钟，BIPM 编号为 1404850）和频标比对器（型号 5125A，Symmetricom）。

2.1 被测冷原子微波守时钟性能表征参数测试结果

2.1.1 频率稳定度

根据标准文档 7.4.1.1 节所述测试方法，对被测冷原子微波守时钟的频率稳定度进行测试。参考频标采用氢钟（BIPM 编号为 140821），其输出 100 MHz 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。

2026 年 2 月 11 日至 2026 年 2 月 27 日，频标比对器自动记录被测冷原子微波守时钟相对于氢钟的相对频率偏差 Y_{1r} ，如图 2 所示。

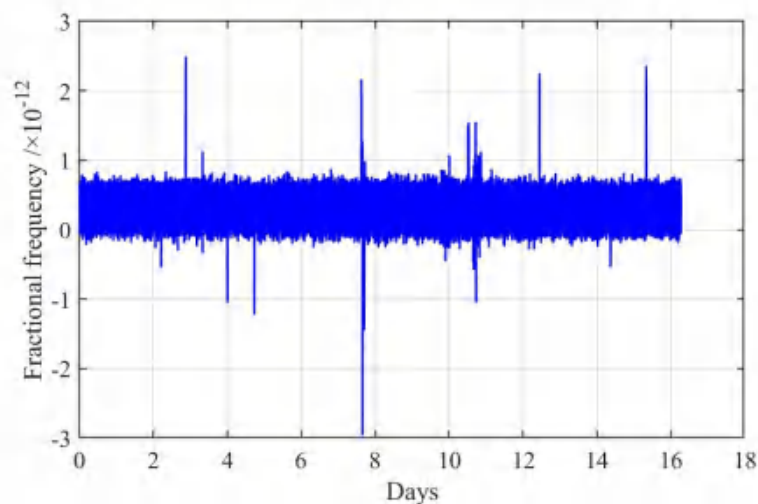


图 2. 2026 年 2 月 11 日至 2026 年 2 月 27 日，测量得到的被测冷原子微波守时钟相对于氢钟的相对频率偏差 Y_{1r}

将相对频率偏差 Y_{1r} 代入本标准文档公式 (1)，得到频率稳定度曲线 $\sigma_{y_{1r}}(\tau)$ ，如图 3 所示。

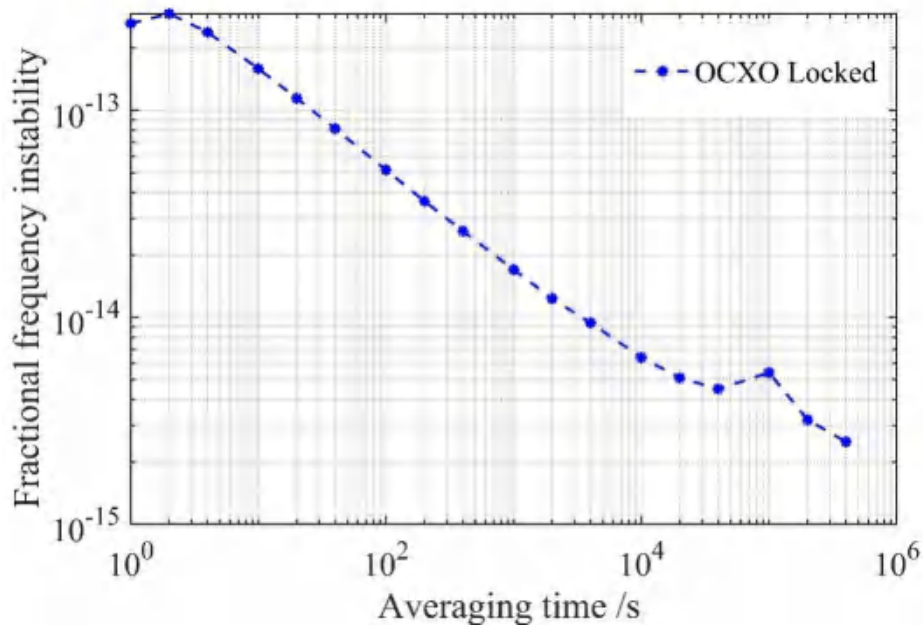


图 3. 相对频率偏差 Y_{1r} 得到频率稳定度曲线 $\sigma_{y_{1r}}(\tau)$

氢钟的频率稳定度已知，根据本标准文档公式（15），得到被测冷原子微波守时钟在不同取样时间下的频率稳定度如表 2 所示。

表 2. 被测冷原子微波守时钟在不同取样时间下的频率稳定度

取样时间	稳定度
1s	5.17E-13
10 s	1.58E-13
100 s	5.12E-14
1000 s	1.69E-14
10000 s	6.37E-15
1 d	5.20E-15

2.1.2 相对频率偏差

根据标准文档 7.4.2 节所述测试方法，对被测冷原子微波守

时钟的频率稳定度进行测试。参考频标采用向国际计量局报数的氢钟（BIPM 编号为 140821），其输出 100 MHz 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，参考频标链接到秒长国家计量基准。

2026 年 2 月 11 日至 2026 年 2 月 27 日，以取样时间 $\tau=1$ d 连续测量，根据频标比对器的测量数据，得到第 i 个取样周期内被测冷原子微波守时钟相对于氢钟的平均相对频率偏差 $Y_{1ri}(\tau)$ ，共测得 17 组数据；同取样时刻、同取样时间，秒长国家计量基准测量得到第 i 个取样周期内参考频标相对于复现秒定义的钟跃迁频率的平均相对频率偏差 $Y_{rpi}(\tau)$ ，共测得 17 组数据；平均相对频率偏差 $Y_{1ri}(\tau)$ 和 $Y_{rpi}(\tau)$ 的测量数据如表 3 所示。

表 3. 被测冷原子微波守时钟和秒长国家计量基准得到取样周期内氢钟的平均相对频率偏差 $Y_{1ri}(\tau)$ 和 $Y_{rpi}(\tau)$ ，取样时间 $\tau=1$ d

测量时间	$Y_{1ri}(\tau)$	$Y_{rpi}(\tau)$	$Y_i(\tau)$
2026.2/11	3.06571E-	-3.605E-14	2.705E-13
2026.2/12	3.07384E-	-3.481E-14	2.726E-13
2026.2/13	3.05251E-	-3.638E-14	2.689E-13
2026.2/14	3.04239E-	-3.497E-14	2.693E-13
2026.2/15	3.01702E-	-3.542E-14	2.663E-13
2026.2/16	3.0245E-13	-3.629E-14	2.662E-13
2026.2/17	3.06039E-	-3.490E-14	2.711E-13
2026.2/18	3.04788E-	-3.590E-14	2.689E-13

2026.2/19	2.93064E-	-3.690E-14	2.562E-13
2026.2/20	2.96472E-	-3.451E-14	2.620E-13
2026.2/21	2.9180E-13	-3.518E-14	2.566E-13
2026.2/22	2.93644E-	-3.584E-14	2.578E-13
2026.2/23	2.87785E-	-3.651E-14	2.513E-13
2026.2/24	2.93365E-	-3.717E-14	2.562E-13
2026.2/25	2.91543E-	-3.594E-14	2.556E-13
2026.2/26	2.92217E-	-3.577E-14	2.564E-13
2026.2/27	2.98727E-	-3.607E-14	2.627E-13
平均值	2.986E-13	-3.580E-	2.628E-13

被测冷原子微波守时钟和秒长国家计量基准所在位置的高度之差为 0 m，根据本标准文档公式 (21)，得到被测冷原子微波守时钟输出频率的相对频率偏差 Y 为 $2.628E-14$ 。

根据本标准文档公式 (23) ~ 公式 (25)，得到被测冷原子微波守时钟的相对频率偏差测量的不确定度见表 4，得到总合成标准不确定度为 $6.83E-15$ 。

表 4. 被测冷原子微波守时钟相对频率偏差测量不确定度

效应	相对不确定度
被测冷原子微波守时钟测量过程的统计不确定度 u_s	$6.80E-15$
秒长国家计量基准的 B 类相对频率不确定度 u_{PFS-B}	$6.8E-16$
测量系统不确定度 u_M	$1.0E-16$

2.1.3 频率漂移率

根据标准文档 7.4.4 节所述测试方法，对被测冷原子微波守时钟的频率漂移率进行测试。2026 年 2 月 11 日至 2026 年 2 月 27 日，以取样时间 $\tau=1\text{ d}$ 连续测量，得到被测冷原子微波守时钟相对于复现秒定义的钟跃迁频率的平均相对频率偏差 $Y_i(\tau)$ ，共 17 组，见表 3 中所示。

根据本标准文档公式 (27)，计算得到被测冷原子微波守时钟的日频率漂移率为 -1.08×10^{-15} 。