

引用格式:刘娅,李孝辉,赵志雄,等.中国精密时间频率测量与控制技术发展[J].时间频率学报,2026,49(1):50-59.

中国精密时间频率测量与控制技术发展

刘娅^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3}, 赵志雄¹, 肖波¹, 樊多盛¹

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:精密时间频率测量与控制技术是产生和保持高稳定度、高准确度标准时间的关键基础技术。回顾了中国在该领域自 20 世纪 50 年代末至今(1958—2025)的发展历程。早期,以南京电讯仪器厂 E312 型通用计数器和中国科学院陕西天文台的精密频率改正器为标志,实现了国产电子测量数字化的开端。随后,数字比相(1983 年)、双混频时差测量(1992 年)等关键技术的相继突破,显著提升了频率测量稳定度($4 \times 10^{-13}/s$),使其接近国际同期水平。进入 21 世纪,高性能时频设备需求爆发式增长,以差拍数字化频率测量为代表的技术创新(2009 年,2019 年)实现了测量噪声抑制能力的重大跃升(秒稳达 10^{-14} , 10^{-15} 量级),高分辨率(5 ps, 1 ps)时间间隔计数器(2005 年,2017 年)也实现国产化。截至 2025 年底,国产高精度时间频率测量与控制设备已形成了系列产品,有力支撑了国家标准时间 UTC(NTSC)产生系统的升级、北斗卫星导航系统等国家重大工程对高精度时频信号的需求,保障了国家时频体系的自主可控与安全。

关键词:精密时间频率;时间间隔测量;频率测量;相位微调;发展史

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0050-10

Development of precision time and frequency measurement and control technology in China

LIU Ya^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3}, ZHAO Zhi-xiong¹, XIAO Bo¹, FAN Duo-sheng¹

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Precision time-frequency measurement and control technology serves as the cornerstone for generating and maintaining high-stability, high-accuracy standard time. This article systematically reviews the historical trajectory of this field in China from 1958 to 2025. The initial phase witnessed breakthroughs in domestically developed instrumentation, marked by the Nanjing Telecommunication Instrument Factory's E312 universal counter and the precision frequency corrector developed by the Shaanxi Astronomical Observatory of Chinese Academy of Sciences (now the National Time Service Center), signifying the advent of electronic measurement digitization in China. Subsequent advancements in core

收稿日期:2025-07-06;接受日期:2025-08-15

基金项目:科技创新 2030-国家科技重大专项(2021ZD0300904)

作者简介:刘娅,女,博士,研究员,主要从事高精度时频测量与传递研究。

technologies—including digital phase comparison (1983) and dual-mixer time-difference (DMTD) measurement (1992)—significantly enhanced frequency measurement precision (achieving frequency stability of 4×10^{-13} at $\tau = 1$ s), progressively approaching international contemporary standards. Entering the 21st century, surging demand for high-performance time-frequency equipment drove transformative innovations such as digital beat-frequency measurement (2009, 2019), which achieved a substantial leap in noise suppression capability (reaching 10^{-14} , 10^{-15} -level stability at 1 s). Concurrently, high-resolution (5 ps, 1 ps) time interval counters attained domestic production (2005, 2017). By the end of 2025, China had established a comprehensive portfolio of precision time-frequency measurement and control devices, robustly supporting critical national initiatives—including the generation of the national standard time UTC(NTSC) and the BeiDou Navigation Satellite System's requirements for precision timing signals—thereby ensuring secure and autonomous operation of the national time-frequency infrastructure.

Keywords: precise time and frequency; time interval measurement; frequency measurement; phase adjustment; historical development

时间包含时刻和间隔两种含义。时刻是指规定时间尺度上的“点”,间隔指两个特定时刻之间持续的时间。时间间隔的基本单位是秒,秒长定义为:铯 133 原子基态的两个超精细能级结构间零磁场跃迁时,辐射频率的 9 192 631 770 个周期持续的时间。比秒更短的时间间隔有毫秒、微秒、纳秒、皮秒、飞秒、阿秒,甚至仄秒(1×10^{-21} s)等。频率是描述周期性事件在单位时间(通常为 1 s)内重复的次数,国际单位为赫兹(Hz)。时间频率测量是指通过实验手段确定时间间隔或周期性信号频率量值的过程,时间(或周期 T)和频率(f)的关系为 $f = 1/T$,因此时间间隔和频率可以互相转换。时间间隔是目前所有物理量及物理常数测量精度最高的物理量,这也得益于频率测量容易获得更高的测量精度。

时间频率控制是指通过科学方法和工程手段,对时频信号的频率和相位进行精确调节、稳定保持和动态管理。核心目标是实现信号的高稳定性和低漂移,为现代电子系统、通信网络和科学设施提供可靠的时间基准。其中测量提供量化评估,控制实现动态优化,时间频率的测量与控制构成闭环系统,保障时间频率信号的稳定性和同步精度。我国标准时间的产生经历了天文时间标准、天文观测校准石英晶振的天文时间标准、以原子时为基准与天文观测的差异通过闰秒进行修正 3 个阶段。天文观测校准石英晶振是时频信号电子测量发展的早期阶段。我国 1970 年 12 月建成并试播的短波授时系统(代号 326 工程)所使用的标准时间则属于第二阶段的典型代表,产生标准时间的时间基准系统核心

设备包括天文观测设备、频率源和测量控制设备。其中频率源是石英晶体振荡器,日稳定度约 10^{-9} 。尽管 1955 和 1965 年前后国际上先后发布了铯原子钟和铷原子钟,但均对我国禁运,我国原子钟的研制始于 1965 年前后。石英晶振作为主要频率源维持短期稳定度,天文观测结果校准石英晶振频率偏差的过程就涉及时间频率的测量和控制。

精密时频测控技术是产生和保持高稳定度、高准确度标准时间的核心基础,也是支撑卫星导航、高速通信、基础物理研究等国家重大工程与前沿科技的关键基石。本文旨在系统梳理中国精密时间频率测量与控制技术自 20 世纪 50 年代末起步至今的主要发展历程。为清晰呈现发展脉络,文章主体将按时间顺序梳理关键节点的技术进步与标志性成果,此外,由于不同时期或制造商对仪器命名有所差异,本文对仪器的分类按仪器核心功能,分为计数器、比相仪和微调器 3 类,介绍时涉及仪器的名称以公开文献或产品手册为准,例如计数器包括通用计数器、时间间隔计数器、脉冲计数器、多通道时间间隔计数器、频率计等;比相仪包括比相仪、双混频时差测量系统、频率稳定度分析仪等;微调器包括频率/相位改正装置、频率/相位微调器、相位微跃计、辅助输出发生器等。

1 1968 年:我国第一代数字频率计问世

二次世界大战后电子技术快速发展,广播、通信、军工领域对高频信号精确测量的需求激增,惠普(Hewlett-Packard)公司于 1951 年推出了 HP

524A,被认为是世界上第一台商用高速频率计数器,也是电子测量数字化的起点,核心原理是通过时基电路生成标准时间间隔(如 1 s),统计被测信号在时间间隔内的周期数,采用十进制计数管和数字逻辑电路实现频率计算,并直接数字化显示频率值,取代了传统示波器或外差式分析仪,将高频信号的测量时间从传统方法的 10 min 缩短至 1~2 s。经过二十多年发展,截至 1977 年,时频计数器已经经历了电子管、晶体管,进入了集成电路阶段,各方面性能有了显著提升、自动化程度显著提高。如美国惠普,后续推出了 5360A 计算计数器,频率测量范围 0.01 Hz~320 MHz,5370A 时间间隔计数器,单次时间间隔测量分辨率 20 ps。日本武田理研(Takeda Riken)的 TR5200 系列自动微波频率计数器将频率测量范围拓展至 10 Hz~32 GHz,是当时自动测频上限最高的频率计,TR5599 通用计数器测频范围 DC~1 GHz,是当时直接计数最高的通用计数器,时间间隔测量分辨率 1 ns^[1]。

这期间,我国的时频测试技术及仪器正处于艰难摸索阶段。1958 年《电信技术》刊发由崔志光提供资料的《直读记数式频率计》^[2],介绍了一种采用国产元器件制作的频率计,使用参考时基生成的秒脉冲信号分别控制两个电子门,形成计数被测信号周期数的测量闸门,该频率计能测量频率不大于 100 kHz 的信号。测量误差包括 1 个周期的计数误差和参考时基不稳定导致的闸门时间误差。这也是我国公开资料最早报道自研频率计的文章。计数单位时间间隔内参考时基周期的个数或计数通过的被测信号周期个数是典型的计数器测量方法,后期主要是在此基础上发展对闸门时间的精确控制、非整周期间隔的测量分辨率提升等技术。

QB306 型六位电子计数频率计是上海邮电器材二厂 1964 年发布的产品,测频范围 100 Hz~1 MHz,测量原理是计数单位闸门时间内通过信号的周期数。资料显示测频准确度为 $1 \text{ Hz} \pm 1 \times 10^{-6} \text{ Hz}$,该仪器由 10 个单元部件和 61 个电子管组成,不含电源的主机约 22 kg,电源箱 32 kg,相较集成电路仪器,电子管时期仪器的体积和质量都非常大^[3]。

同一时期,上海新建电子仪器厂也先后推出了 PJD 系列计数式频率计,其中 1966 年报道的 PJD-7 型电子计数式频率计,能自动连续测试,可测频率和时间间隔、周期,频率测量范围 10 Hz~

10.1 MHz,有 0.001~10 s 等多种闸门时间可选,时间间隔测量分辨率为 0.1 μs ,整机约 60 kg^[4-6]。

1968 年前后,南京电讯仪器厂(现中电科南京电子设备研究所)推出 E312 型数字频率计,是我国有公开资料以来第一台将数字冠于频率计前的电子时频测试仪器,后升级为 E312A 型,用大规模集成电路代替电子管,集成了计数、控制、显示驱动等功能,E312A 具有双输入(A、B)通道,支持的工作模式包括自校、频率、周期、时间、计数、插测、A/B 7 种,频率测量范围为 1 Hz~10 MHz,时间间隔测量范围为 200 ns~100 s。

这一时期发展的各频率计测量原理与性能相近,且多同时具有频率、时间或周期测量能力,比如上海无线电仪器厂的 PS-43 型数字式频率计、上海新华仪表厂的 PPJ 系列集成数字频率计等(实物如图 1 所示),即频率计同时也是时间间隔计数器^[7-8]。



图 1 从左至右依次为 QB306、PS-43、PPJ-10 外形图

图 2 为南京电讯仪器厂编印的《E312 型数字频率计维护及修理》手册^[9]封面。为规范同类计数器产品的技术要求、测试方法及检验等规则,还编制了《E312A 型通用计数器》行业标准,由中华人民共和国机械电子工业部发布,自 1991 年 7 月 1 日起实施,于 2010 年 1 月 20 日废止。

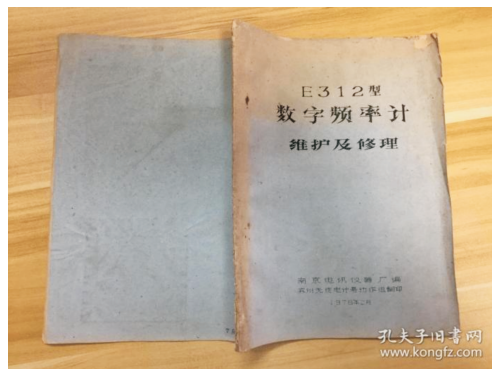


图 2 我国第一代数字频率计维护及修理说明书

随着各行业如激光测距、爆破试验等对高分辨率时间间隔测量的迫切需求,上海无线电仪器厂、中国工程物理研究院流体物理研究所等机构,先后基于模拟内插原理推出时间间隔计数器,1980 年前

后,我国已实现 0.1 ns 时间间隔测量分辨率^[10-11]。

在频率计的发展方面,因基本原理与时间间隔计数器类似,且多数通用计数器兼具时间间隔和频率计功能,精度要求相对较低且技术较为成熟,本文不再展开。后文主要介绍面向原子钟等高准确度信号的频率测量或比相控制技术及仪器。

2 1978 年:我国第一代频率和相位微调装置研制成功

为提高原子时的准确性和稳定性,常采用多台原子钟共同产生原子时,因此需要对各原子钟产生的周期进行测量、综合,生成的原子时是一个纸面时间尺度。标准时间的物理信号产生是以原子时(纸面时)为基准,对主用原子钟的相位、频率进行微调,使其尽可能以接近纸面原子时的特征性能输出信号。相位或频率的调整一般不直接实施在原子钟上,而是通过相位微调仪等兼具控制与信号净化功能的设备间接实现,主要原因包括两方面:一是原子时计算依赖对原子钟长期性能的监测与建模预测,直接调整参与原子时计算的主用原子钟物理参数,会破坏其可预测性;二是原子钟输出信号的频率调整范围和分辨率有限,存在不满足调整需求的情况。因此大部分守时实验室不直接调整原子钟,而是通过频率相位控制设备“间接调整”。相位微调仪以原子钟的频率为参考,结合与原子时的比对结果生成控制量,修正原子钟输出信号,使其输出能够代表本地原子时的频率稳定性和准确度。此外,部分授时和用时系统也需要借助相位微调仪校正原子钟的输出,产生符合需要的参考时间和频率信号,因此相位微调仪是时间产生和用时系统的重要组成部分。

1978 年,中国科学院陕西天文台(2001 年更名为中国科学院国家授时中心)报道了我国第一代精密频率相位改正装置“精密频率改正器”研制成功的消息,该设备以粗移相和细移相结合的方式,兼顾较宽的调整范围和较高调整分辨率,实现 1 ns 相位调整分辨率, 1×10^{-14} 的频率调整分辨率,并与同期美国的相位微调器 2025A 进行了比对测试,具体测试流程是先进进行两台美国设备的互比,得到最大相位偏差为 1.5 ns,标准差为 0.5 ns;然后进行中

为 0.7 ns。测试结果表明所研制设备性能与同期美国设备相当。该成果应用于协调世界时 UTC(CSAO)(CSAO 是陕西天文台的英文简称)的产生,解决了当时我国国家标准时间 UTC(CSAO)主钟信号高分辨率相位修正难题,也标志着我国时频测控技术自主化的开端^[12]。

1987 年,针对国内多家机构计划通过联合守时提升原子时精度的需求,陕西天文台团队在精密频率改正器基础上优化方案,最终应用至综合原子时 UTC(JATC)系统的相位微调器,相位调整分辨率较第一代提高了 3 个量级,达皮秒量级。

3 1983 年:我国第一台数字比相仪频率测量稳定度 $3 \times 10^{-9}/s$

在数字比相仪出现之前,基于模拟信号处理的比相仪多采用触发器型检相器、滤波器处理信号,然后用长图记录器记录结果。这种方法容易实现,但受分辨率限制,仅能分辨约 10 ns 量级的相位差,难以满足更高分辨率的测量需求,且在输入信号相位差较小时存在测量死区,为解决上述问题,学术界形成了两种解决思路。

一是西安电子科技大学团队提出的“单路分频控制鉴相”的线性鉴相方法,原理是利用线性比相,单路分频控制鉴相法和比对信号之间的倍数关系,控制鉴相区域,保证比对的高线性度,据此分析两路信号的相对频率偏差。通过降低对元器件开关速度的要求来减少死区限制,研制的比相仪 24 h 累积误差约为 0.2 ns,短期测量稳定度理论上可达 10^{-12} 量级,相关成果发表在 1981 年的《计量学报》^[13]。

另一种是陕西天文台的数字比相方案,基于数字锁相接收机原理,待测信号经数字检相器接入后,通过数字移相器将参考频率和待测频率调整为相位差已知且便于测量的脉冲信号。然后利用可逆计数器测量移相值,进而计算两信号的频率差(工作原理和系统组成分别见图 3 和图 4)。基于上述方案研制了数字比相仪,减小了模拟比相仪中检相死区对测量的影响,还能数字化显示相位差值,相位测量分辨率提高到 0.1 ns,日测量稳定度约 3×10^{-14} ,这也是我国第一台数字比相仪,发表于 1983 年《陕西天文台台刊》(现《时间频率学报》)的“一种数字比相仪的设计”介绍了该成果^[14]。

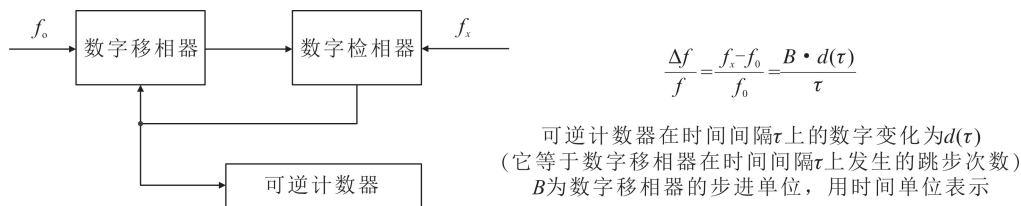


图 3 数字比相仪的工作原理图

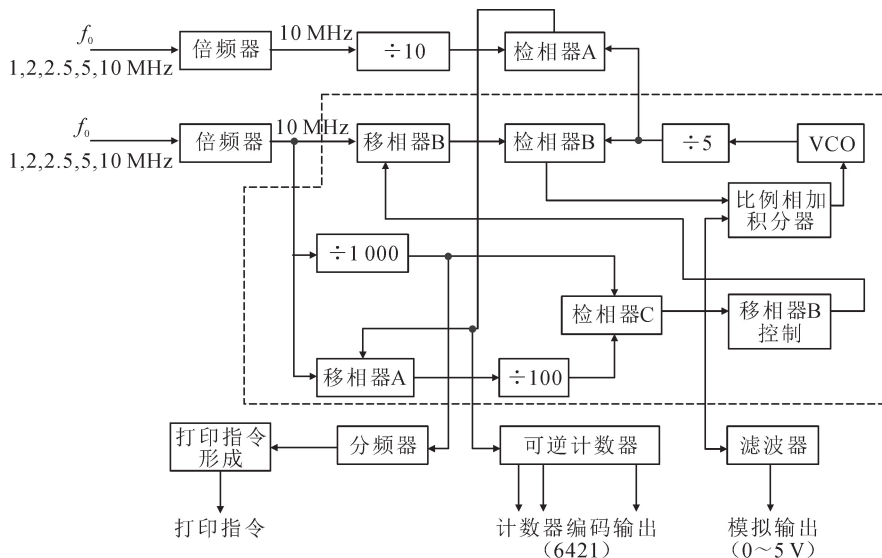


图 4 数字比相仪的组成图

4 1992 年:国产双混频时差测量系统 底噪 $4 \times 10^{-13}/\text{s}$, 达国际同期水平

20 世纪 70 年代,美国 Allan^[15] 为克服传统时间间隔计数器易受噪声干扰问题,首次提出了双混频时差法(dual mixer time difference, DMTD)。时至今日,DMTD 依然被认为是一种经典的高精度时间频率测量方法,原理是用与待测频率有一定偏差的中间振荡器分别与待测频率、参考频率混频(降低待测信号中心频率并保留相位信息),经低通滤波后得到两路差拍频率信号,比对两路差拍信号的相位差(时差),可获得待测频率相对参考频率的频率偏差信息。为减小中间振荡器影响并方便测量,通常在待测或参考通道中增加移相器来保证,测量原理如图 5 所示。DMTD 主要用于稳定度较高的频率源(如各类原子钟)的测量^[16-17]。

DMTD 可以直接测量两标称频率相同的频率信号之间的相位差,通过记录相位差随时间的起伏变化进而计算出被测频率源相对于参考的频率偏差,用于统计频率稳定度,最短可以得到取样间隔毫秒的频率稳定度。

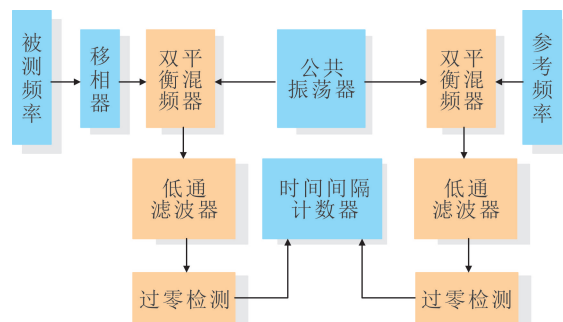


图 5 双混频时差法(DMTD)工作原理图

双混频时差测量系统的关键部件包括差拍器(含双平衡混频、低通滤波等模块)、偏差频率产生器(又称公共振荡器)等。为尽快实现当时具有最高性能的 DMTD 仪器的国产化,陕西天文台组织队伍采取各部件并行研发、分头突破的攻关路线,先后研制了附加噪声优于 $5 \times 10^{-13}/\text{s}$ 的 5.001 MHz 低噪声综合器、附加噪声影响优于 0.1 ps(RMS)的差拍器,并于 1992 年公布了基于 DMTD 原理的多路皮秒级时差测量系统的测试结果,频率测量系统本底噪声 $4 \times 10^{-13}/\text{s}$ (Allan 偏差),达到了同期国外设备的性能^[18-21]。

2009 年,中国计量科学研究院团队,发表了基于 DMTD 的 8 通道频率稳定度测量系统,将测量 10 MHz 信号的系统本底噪声提升至 $2 \times 10^{-13}/s^{[22]}$ 。

5 2005 年,国产 5 ps 分辨率时间间隔计数器研发成功

科学研究、通讯、导航以及精密计量等各类测量需求也在推动时间间隔计数器分辨率的提升。

1989 年,美国 SRS 公司的 SR620 通用时间间隔计数器单次测量分辨率为 50 ps。作为标准时间产生的重要组成,我国曾大量进口该系列计数器。相较于国外仪器,我国仪器的测量能力还有一定差距,为避免受制于人,我国科研人员一直在研究提升时间间隔测量分辨率的方法,但受限于器件及电路加工工艺等能力,进展缓慢。1986 年,上海无线电仪器厂推出内置 Z80 微处理器的 AS3341 通用电子计数器,采用输入同步、多周期平均等技术,实现了高、低频的等分辨率测量,单次时间间隔测量分辨率为 10 ns,通过 N 次平均,在被测信号与时基信号不相干时,可以将分辨率提高 $\frac{1}{\sqrt{N}}$,这是我国在器件、电路改进受挫后转而通过数据统计方式提高分辨率的一种尝试^[23]。

2001 年,中国科学院国家授时中心组建团队研制提高时间间隔计数器分辨率的方法,基本原理是在输入信号高电平时开门,触发斜坡电路线性升高,并开通脉冲计数器电路和关门通道,当时基脉冲到来时记录脉冲数,第一个脉冲使 A/D(analog/digital)转换器由采样状态进入保持状态,触发单片机开始 AD 转换。当关门脉冲到来时,起动斜坡电路线性升高,此后的第一个时钟脉冲完成最后一次脉冲计数并终止计数。同时触发单片机做关门脉冲 AD 转换。开门通道和关门通道开通后,只允许一个脉冲信号通过,直至下一次低电平向高电平转变发生。为提高测量分辨率,还需对 A/D 转换的非线性进行校正,使其线性度达 0.2%。计数器工作原理如图 6 所示。但最终实测仅实现了 10 ns 的测量准确度,分辨率 0.2 ns,与预期还有差距。项目组分析原因,可能是受器件延迟和触发点波动等影响,经方案优化,2005 年完成的嵌入式时间间隔计数器将测量准确度提升至 1 ns,分辨率达到了 5 ps,达到国际同期先进水平^[24-26]。

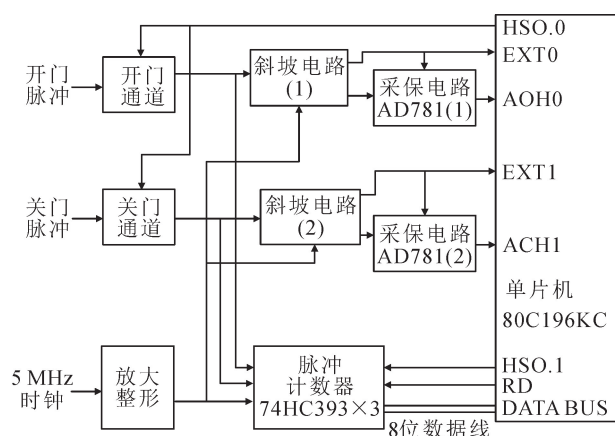


图 6 时间间隔计数器工作原理图

6 2009 年:差拍数字化频率测量技术将频率测量底噪降至 $5 \times 10^{-14}/s$

双混频时差测量作为经典的频率测量方法,采用差拍技术将信号降频后测量,能将测量分辨率提高差拍因子 k (其中 $k = \frac{f_0}{f_b}$, f_0 为被测信号与参考信号的标称频率, f_b 为混频后生成的差拍信号频率)倍,同时双输入对称结构的测量系统,可以抵消测量通道附加的共有噪声影响,测量 10 MHz 信号能实现优于 $5 \times 10^{-13}/s$ 的本底噪声。随着原子钟技术的发展,传统的 DMTD 难以满足秒级稳定度 10^{-14} 量级的氢原子钟等高性能振荡器测量需求。

DMTD 的测量噪声一定程度上依赖通道间附加噪声的相关性,受电路加工工艺、器件一致性等限制,测量性能受系统误差和随机误差影响,其中通道间共有的噪声可以在时差测量时抵消,残余非共性噪声影响约在 10^{-13} 量级。因此 DMTD 自诞生 30 余年来,尤其 20 世纪 90 年代进入 10^{-13} 量级后,性能没有显著提升。2009 年,美国 Symmetri-com 公司发布公告(大意):使用传统的双混频时差测量方法,测量精度已经没有上升空间,停止相应产品的研发。

国家授时中心在 2004 年即启动了频率新测量方法的研究,提出了两种技术路线:一是全数字化的欠采样频率测量方法,原理是根据待测信号的标称频率针对性设计采样率,采样率须满足提取待测信号频率偏差信息。比如测量标称频率 10 MHz 的信号,采样率设为 9 999 Hz,待测信号经采样后转换为标称频率 1 kHz 的数字信号,相当于每周采

样 10 个点,通过数字互相关处理估计待测信号频率。2010 年基于该方法研制的样机,测量 10 MHz 信号的本底噪声为 $1 \times 10^{-12}/\text{s}$ (Allan 偏差)^[27]。结果证明了该全数字化方法测频的可行性,但性能未能突破 DMTD 水平,主要原因是测量性能高度依赖模数转换器采样时钟的稳定性,而当时高分辨率模数转换器的采样时钟稳定性难以满足更低噪声的测试需求,而制作符合要求的模数转换器并非一时之功,因此团队暂时搁置了该方法的研究;二是模拟与数字结合的差拍数字化频率测量方法,基本原理是沿用 DMTD 的对称结构,通过差拍器先将待测频率降低到低频段,然后对差拍后的信号高速采样,最后使用数字互相关估计待测频率。与传统 DMTD 区别在于,差拍器输出信号是便于数字化的正弦型,然后经多通道同步高速采样、数字方法估计频率。该方法因差拍将待测信号中心频率降低到低频段,更容易实现对信号的高速采样,典型的频率测量可以基于每个周期超过 100 个点的采样数据获得,相较于传统 DMTD 仅过零单点检测,容易实现更高的噪声抑制能力。2007 年基于该方法完成原理样机研制,2010 年完成差拍数字化频率稳定度分析仪工程样机研制(实物见图 7),测试 10 MHz 信号本底噪声 $4.7 \times 10^{-14}/\text{s}$ (Allan 偏差),与当时本底噪声 ($5 \times 10^{-14}/\text{s}$) 的商用仪器相当,如德国 Time-Tech 的比相仪 (PCO)、英国 Quartzlock 的频标比对及相噪测试系统 (A7) 等^[28-29]。

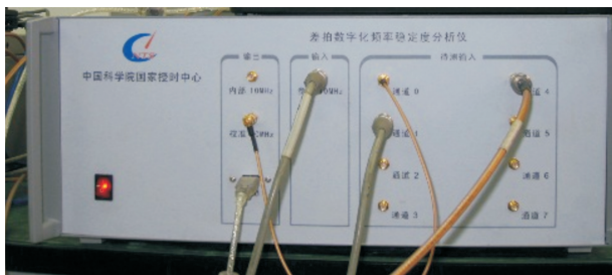


图 7 差拍数字化频率稳定度分析仪实物图

2009 年,北京无线电计量测试研究所报道了一种瞄准小型化应用的频率比对器,基于差拍频率法,可以测试 1~30 MHz 范围的频率信号,噪底为 $1 \times 10^{-12}/\text{s}$,可用于对铷、铯等原子钟的测试^[30]。

2013 年,针对北斗卫星主备信号链路精密相位测量需求,中国科学院国家授时中心联合中国科学院上海微小卫星工程中心、中国电子科技集团第 29 研究所,开展技术攻关,研制基于差拍数字化频率测量方法的比相载荷,原理样机实测比相分辨率

0.8 ps,超过 Galileo 的 24 ps 水平,后由 29 所研制正样服役某型卫星。

7 2014 年:利用相位关系的宽范围频率测量技术取得进展

原子钟典型输出信号为标准频率,如 5、10、100 MHz 等,高性能频率测量仪器主要针对标准频率进行测试,随着各领域对频率信号性能需求的提升,10.23、1.024、80 MHz 等特殊频率测试需求增加,对频率测量仪器的测试范围也从标准点频扩展至一定范围内任意频点的高精度测试。

相位比对是时频测控领域实现高分辨率测量的重要手段,周期信号之间相位差的变化反映信号间的相对频差,因此通过对任意频率信号之间相位关系的分析,可以实现对待测信号相位差、相位噪声、频率及频率稳定度的测量。西安电子科技大学团队通过研究频率信号间的相位关系,提出两种测量方案:① 当参考与待测信号频率标称值不同时,利用周期信号间相位差具有和标称值等效的比例关系这一特征,引入标称频率的最小公倍数周期,实现标称值不同且不具有倍数关系的信号之间的直接比对,即任意频率的信号之间直接相位比对。该方法能够满足宽频率范围频率测试需求,自校情况下测量本底噪声 $1 \times 10^{-15}/\text{s}$,在测量情况下,能达到 $1 \times 10^{-13}/\text{s}$ 。② 对高分辨率相位差测量技术进行研究,提出通过相位差群同步,消除任意周期信号相位差测量中的量化误差的方法。在等效鉴相频率、最小公倍数周期和等效比对等概念和理论基础之上,引入公共振荡源,利用相位差群同步和标称值呈倍数关系的周期性信号之间的相位比对关系,实现高分辨率的相位差测量,测试 10 MHz 信号的相位差测量分辨率 10 ps^[31]。

8 2017 年,国产时间间隔测量计数器测量分辨率达皮秒量级

尽管国内已经有了一些技术和仪器达到国外同类仪器水平,但因技术成熟度、可靠性、用户使用习惯等原因,21 世纪以来,我国高端时频测量仪器主要依赖进口,如美国斯坦福 (SRS)、美国惠普 (后来的安捷伦、是德)、美国 Microchip、瑞典 Pendulum、美国 Spectradynamics 等。但我国研究人员没放弃自主发展,持续进行高端时频测量方法和仪器的研发。

在时间间隔计数器研究方面,主要通过增加测量通道、扩展测量范围、提高测量分辨率等提升国产仪器的竞争力,其中提升测量分辨率的主要思路是延展(或放大)非整脉冲周期的时间间隔,然后再测量,比如内插法、时间间隔平均法、游标法和量化时延等,其中应用较广的时间数字转换器(TDC)就是一种高分辨率的时间间隔测量电路,将时间差转化为可被数字系统处理的数字,提高测量分辨率,目前已发展为多款集成芯片。2017 年国家授时中心研制的多通道时间间隔计数器,就是基于 TDC

芯片实现,具有 12 个独立测量通道,能实时分析测试数据,生成被测信号的频率偏差、稳定度等,测量分辨率优于 16 ps。同期推出的两通道时间间隔计数器,测量分辨率达到 1 ps,接近如今分辨率最高的美国 Guidetech 计数器 0.9 ps 水平^[32-40]。

近年随着国际贸易争端加剧,国产时间间隔测量仪器迅速发展、成熟,国内多家机构已具备研制生产高分辨率时间间隔计数器的能力,部分型号甚至达到了国际同等水平。截至 2024 年底,主要产品型号及性能指标如表 1 所示。

表 1 当前主要的国产时间间隔计数器

生产厂商	产品型号	通道数	分辨率/ps
嘉兴泰传	T-TIC-NO2	双通道	1
北京一朴	MTIM-712	4/8/16 通道	20
星汉时空	TM-TIC016	16 通道	1
成都金诺信	XPTM-S910X	16 通道	100
成都泰富	TFT1010	单通道	100
成都同相	STT-TC	8/16 通道	100
西安宏泰	HT5350	多通道可选	200

9 2019 年:频率测量秒级稳定度突破,中美俄进入 10^{-15} 量级俱乐部

2012 年,在国家自然科学基金委重大科研仪器研制“新一代时间频率系统”项目支持下,国家授时中心团队在前期差拍数字化频率测量方法基础上,改进测量和自校准方案、优化频率估计算法,研制了多通道频率稳定度分析仪,能同时测量 8 路、频率范围 1~100 MHz 的信号,并能实时生成频率、相位

差、频率稳定度等测量结果。2019 年 6 月 24 日,经专家组现场测试,测量 10 MHz 信号的本底噪声(Allan 偏差)为 $6.3\times 10^{-15}/\text{s}$,使中国与美国($5.0\times 10^{-15}/\text{s}$)、俄罗斯(进入 $10^{-15}/\text{s}$)一起,成为测量能力进入 $10^{-15}/\text{s}$ 量级的国家^[41]。

随着各行业需求的增加,近年国内多家机构基于频率测量研究成果先后推出了多款国产精密频率测量设备,表 2 展示了截至 2024 年底,主要产品及其测量 10 MHz 信号的秒级稳定度指标。

表 2 当前主要的国产精密频率测量设备

生产厂商	名称	型号	秒稳/10 MHz
成都同相	多通道比相仪	STT-PC	1.8×10^{-14}
星汉时空	多通道频标比对器	TM-PC08/16	2×10^{-14}
浙江赛思	多通道数字化频稳测试分析仪	PT1300	5×10^{-14}
西安宏泰	多通道频稳测试仪	HT5360	8×10^{-14}
成都金诺信	频率测量设备	XPTM-S911X	1×10^{-12}
成都天奥	多路频标测试仪	XHTF3596F	2×10^{-12}

10 2025 年:相位微调指标对齐美俄,高分辨率控制不再受制于人

随着我国时频技术的不断发展,频率相位控制

技术也在不断进步,近十年国内已有多家企业和科研机构加入到频率相位控制设备的研发行列,推动技术不断升级,产品类型的丰富,部分型号指标达到甚至优于国际同类产品,比如西安宏泰时频技

术有限公司研发的“HT5220 相位微调仪”,相位调整分辨率达 1 fs,频率调整分辨率达 5×10^{-19} ,成都同相科技有限公司推出的“STZ-MS 相位微跃计”,相位微跃分辨率 0.024 fs,频率微调分辨率达到 1×10^{-19} ,优于美国 SDI 公司的 HROG-10 相位微调仪 0.15 fs 相位调整分辨率和 5×10^{-19} 的频率

调整分辨率,以及俄罗斯 VCH-317 的 1 ps 和 1×10^{-18} ,追平国际顶尖的美国 Microchip 公司同类产品 AOG110 的 1×10^{-19} 频率调整分辨率,可以适配氢原子钟的驾驭需求。截至 2025 年 3 月,主要的国产相位微调设备如表 3 所示。

表 3 当前主要的国产相位微调设备

生产厂商	名称	型号	相位/频率微调分辨率
成都同相	相位微跃计	STZ-MS	0.024 fs/ 1×10^{-19}
星汉时空	相位微调器	TG-OG2	1 ps/ 1×10^{-18}
浙江赛思	相位微跃计	MS4130	0.024 fs/ 5×10^{-19}
西安宏泰	相位微调仪	HT5220	1 fs/ 5×10^{-19}
儒科电子	频率相位微跃计	MS2000	1 ps/ 1×10^{-19}

如今,我国频率相位控制设备已从“跟跑”走向“并跑”,各行业需求也可以自给自足,不再受制于人。

11 结语

我国精密时间频率测量与控制技术四十余年的发展历程,是一部从技术引进、消化吸收到自主创新与关键技术突破的奋斗史。始于重大科技基础设施 326 工程需求,以及国内多个团队在时频测量和相位微调的奠基性工作,逐步建立起自主技术体系。1992 年双混频时差测量系统达到国际先进水平,标志着我国在时频精密测量领域奠定了坚实的技术基础。截至 2025 年,在国际技术竞争、贸易摩擦加剧背景下,皮秒级时间间隔测量、 10^{-15} /s 频率测量本底噪声的技术突破、相位/频率微调分辨率对齐美俄顶尖水平,使我国在该领域跻身世界前列。众多科研机构、高校和企业的协同攻关推动了产业发展,高性能时间频率测量与控制设备不仅能满足国家标准时间产生、北斗卫星导航系统等国家重大工程的需求,还为各行业提供了高端国产仪器选择,显著降低对进口设备的依赖度,保障了国家时频体系的安全自主可控。

展望未来,随着原子钟及时频传递技术的飞速发展,对时频测量与控制的精度、稳定度、可靠性和应用灵活性提出了更高要求。集成光电子学为实现小型化、低功耗的高精度时频测控模块提供了可能。人工智能技术(如深度学习)在信号处理、噪声抑制、设备状态监测与故障预测等方面的应用潜力巨大。构建全球统一、更高精度的时空基准,以及支撑空天地海一体化高精度导航定位、深空探测、

引力波探测、基本物理常数测量等前沿科学研究和重大工程应用,将持续驱动时频测控技术向更高性能、更智能化、更网络化、更小型化的方向发展。时频科技工作者需继续面向国家重大战略需求、聚焦国际前沿,加强基础研究、关键技术攻关与核心器件自主可控,持续推动高性能时频测量与控制仪器设备的自主创新与产业应用,提升我国在该领域的国际竞争力^[42-45]。

参考文献:

[1] 陈常愉,陆垓. 国外电子计数器发展的现状及趋向(兼谈对我国发展电子计数器的看法)[J]. 电子测量技术, 1977(2):32-51.

[2] 佚名. 直讀記數式頻率計[J]. 电信科学, 1958(7):49-52+65.

[3] 邱传训. QB306 型六位电子计数频率计[J]. 电子技术, 1964(10):41-42.

[4] 迅. PJD-7 型电子计数式频率计[J]. 电子技术, 1966(1):42-44.

[5] 电工仪表研究所数字仪表讲座编写组. 数字仪表浅说[J]. 电测与仪表, 1970,7(1):16-27.

[6] 湖南省水利电力中心实验所电测室. 用 E312 型数字频率表校验工频频率表的方法[J]. 电测与仪表, 1971(4):2-3.

[7] 佚名. PS-43 型数字式频率计[J]. 电子技术, 1973(4):35.

[8] 上海新华仪表厂. PPJ 系列集成数字频率计[J]. 电测与仪表, 1973(9):29-37.

[9] 南京电讯仪器厂. E312 型数字频率计维护及修理[Z]. 南京:南京电讯仪器厂, 1978.

[10] 李振宇. 精密时间间隔计数器在激光人卫测距等方面

- 的应用[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1981(3): 216-220.
- [11] 邵英斌, 董金轩, 曹科峰. DL—32/16 型多路时间间隔测量仪及其应用[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(1): 91-96.
- [12] 边玉敬, 郑恒秋. 精密频率改正器的研制[J]. 陕西天文台台刊(现时间频率学报), 1979, 2(1): 40-46.
- [13] 周渭. 实现高频下高线性度鉴相的方法—单路变频控制鉴相[J]. 计量学报, 1981, 2(1): 75-79.
- [14] 边玉敬, 陈淑芳. 一种数字比相仪的设计[J]. 陕西天文台台刊(现时间频率学报), 1983, 6(2): 50-57.
- [15] ALLAND W, DAAMS H. Picosecond time difference measurement system [C]//Proceedings 29th Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City: IEEE, 1975: 404-411.
- [16] HOWED A, ALLAN D W, BARNES J A. Properties of signal sources and measurement methods [C]//Thirty Fifth Annual Frequency Control Symposium, Philadelphia, Pennsylvania: IEEE, 1981: 1-47.
- [17] STEIN S R. Frequency and time—their measurement and characterization[J]. Precision Frequency Control, 1985 (2): 191-416.
- [18] 王丹妮, 边玉敬. 5.001 MHz 低噪声综合器的研制[J]. 陕西天文台台刊(现时间频率学报), 1991, 14(2): 164-167.
- [19] 边玉敬. 双混频时差测量系统设计中的理论和技术问题[J]. 陕西天文台台刊(现时间频率学报), 1991, 14(2): 156-163.
- [20] 陈淑芳, 边玉敬. 高性能差拍器的研制[J]. 陕西天文台台刊(现时间频率学报), 1991, 14(2): 168-171.
- [21] 边玉敬, 陈淑芳, 王丹妮. 多路微微秒时差自动测量系统的研制[J]. 电子测量技术, 1992(1): 50-52.
- [22] 张爱敏, 高小珣, 宁大愚, 等. 多通道双混频时差测量系统的实现[J]. 计量学报, 2009, 30(6): 563-566.
- [23] 叶忠毅, 涂凌, 何华英. AS3341 通用电子计数器[J]. 电子技术, 1986(11): 482-486.
- [24] 蔡见祥. 脉冲与时间间隔测量[J]. 陕西天文台台刊(现时间频率学报), 1992, 15(1): 62-63.
- [25] 樊战友, 王大琴, 李志刚, 等. 时间间隔计数器的研制[J]. 陕西天文台台刊(现时间频率学报), 2000, 23(2): 116-122.
- [26] 樊战友, 胡永辉, 边玉敬. 嵌入式时间间隔计数器的研制[J]. 时间频率学报, 2005, 28(1): 7-14.
- [27] 王玉兰. 基于低采样率的高频信号精密数字化测量方法研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(中国科学院国家授时中心), 2010.
- [28] 刘娅. 虚拟化差拍频率计的研究与设计[D]. 西安: 中国科学院研究生院(中国科学院国家授时中心), 2007.
- [29] 刘娅. 多通道数字化频率测量方法研究与实现[D]. 西安: 中国科学院研究生院(中国科学院国家授时中心), 2010.
- [30] 杨同敏, 李春景, 高连山, 等. 小型高精度频率比对器的研制 [C]//2009 全国时间频率学术会议, 成都: 中国天文学会时间频率专业委员会, 2009: 359-364.
- [31] 屈八一, 王黎黎, 李智奇, 等. 基于相位重合现象的分辨率在十皮秒量级的比相仪 [C]//2007 年首届仪表、自动化与先进集成技术大会, 丽江: 中国仪器仪表学会, 2007.
- [32] 施韶华, 李孝辉, 张慧君. 基于 TDC-GPX 的多通道时间间隔测量系统设计 [C]//第三届全国虚拟仪器学术交流大会, 桂林: 中国仪器仪表学会, 2009.
- [33] 赵侃, 梁双有, 陈法喜, 等. 精密时间间隔计数器的研制 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(5): 602-606.
- [34] PREDEHL K, GROSCHE SMF, DROSTE S, et al. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place [J]. Science, 2012, 336(6080): 441-444.
- [35] 赵志雄, 李孝辉, 刘娅, 等. 基于 PCI 总线的高精度大量程时间间隔计数器研制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1317-1324.
- [36] 孟令达, 施韶华, 赵志雄, 等. 多通道时间间隔测量分析系统的设计与实现 [J]. 时间频率学报, 2017, 40(2): 80-86.
- [37] 潘峰, 张军, 霍海强, 等. 国产皮秒级多通道时间间隔测量仪在工程中的应用 [J]. 时间频率学报, 2019, 42(4): 301-309.
- [38] 陈法喜, 孔维成, 赵侃, 等. 皮秒级 16 通道精密事件计时器研制 [J]. 时间频率学报, 2020, 43(2): 85-93.
- [39] 邓智峰. 多通道精密时间间隔分析仪工程样机设计实现 [D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2021.
- [40] 邓智峰, 刘娅, 刘音华, 等. 多通道时间间隔实时分析仪设计与实现 [J]. 宇航计测技术, 2021, 41(1): 20-26.
- [41] XIAO B, LIU Y, XUE Y R, et al. A study on autonomous integrity monitoring of multiple atomic clocks [J]. Measurement Science Review, 2022, 22(5): 202-207.
- [42] 王义道. 时间频率量的特征及其对时频系统建设的影响 [J]. 时间频率学报, 2003, 26(2): 81-86.
- [43] KOLKOWITZ S. Applications of clocks and frequency metrology [J]. Annual Review of Cold Atoms and Molecules, 2021(9): 215-258.
- [44] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J. Optical atomic clocks [J]. Reviews of Modern Physics, 2015, 87(2): 637-701.
- [45] ITU-R. Recommendation TF. 2381: Autonomous control for time-frequency equipment [S]. 2023.