

## 国内外氢钟最新发展及我国氢钟未来发展趋势

王文明

(北京无线电计量测试研究所, 北京 100854)

**摘要:** 首先介绍了当前氢钟领域的发展现状, 给出了各种工程化实用型氢钟最新主要性能指标。之后对当前的研究热门空间用氢钟的发展水平及应用方向也做出简要介绍。最后, 着重对氢钟的未来技术发展方向进行分析与展望。

**关键词:** 氢原子钟; 空间氢钟; 最新发展

**中图分类号:** TB939   **文献标志码:** A   **文章编号:** 2095-8110(2015)06-0048-07

### The Current Development of Atomic Hydrogen Clock and the Future Technology Development Trends in China

WANG Wen-ming

(Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The present status of hydrogen maser in the world was described, including the latest performance of commercial hydrogen maser. The Latest research level and development of space hydrogen maser was also introduced, which is being studied extensively by researchers. Finally, the future technology developments of hydrogen maser have been reviewed in this paper.

**Key words:** Hydrogen maser; Space hydrogen maser; Current development

## 0 引言

作为实用型原子钟之一的氢频标以其优异的中短期稳定度成为目前世界上应用最广的地面原子频标之一。在氢频标家族中的主动型氢原子钟迄今为止仍然保持着稳定度的最高记录。伴随着科学技术的发展, 某些测量所要求的时频稳定性只有氢原子钟才能满足。氢原子钟的应用已经深入到社会的许多领域, 例如守时授时、导航定位、深空探测、时间同步、时频计量、基础科学研究、作战平台应用等。其发展和应用涉及科技、经济、军事等诸多方面。基于氢原子钟的精确计时是现代社会的正常运转和发展的基础。在这种大背景下, 各相关研制单位纷纷抓住机遇, 不断推陈出新以

占领更大的市场。

## 1 地面工程化实用型氢原子钟发展现状

当前, 国内外致力于发展氢原子钟技术并实现商品化生产的研究所和公司主要有: 美国的 Symmetricom 公司、俄罗斯的 Vremya-CH 公司、瑞士的 Spectratime 公司和 T4Science 公司、中国的航天科工集团二〇三所及中科院上海天文台。

美国的 Symmetricom 公司主要生产主动型氢原子钟 (MHM-2010), 产品主要用于参与国际连测的各 VLBI 站点和其国内各大天文台、守时中心、美国国家标准局及国家物理实验室等。产品在国际上同类产品性能水平较高, 技术相对成熟, 可靠性高, 但体积大、笨重, 不宜搬运。

收稿日期: 2015 - 04 - 12; 修订日期: 2015 - 06 - 12。

作者简介: 王文明 (1985 - ), 男, 博士, 高工, 主要从事地面守时主动氢钟、空间主动氢钟及星载被动氢钟方面的研究。E-mail: wwm\_kingdom@163.com

俄罗斯原有两家长期从事各类氢钟研制和生产的公司,分别是 Kvarz 公司和 Vremya-CH 公司。Kvarz 公司生产的 CH1-75 型主动型氢钟和 CH1-76A 型被动型氢钟曾在同类产品中性能最优,产品遍布世界多个国家。

俄罗斯的 Vremya-CH 公司也是一家长期从事各类氢原子钟研制和生产的单位,公司此前在售的 VCH1003A 型主动型氢钟和 VCH1006 型被动型氢钟占据了很大的市场比例。该公司新近推出的 VCH1003M 主动型氢原子钟和 VCH1008 被动型氢原子钟引领国际氢钟最高发展水平。

研发中心设在瑞士的 T4Science 公司,主要从事主动型氢原子钟的研制、生产和销售。它的发展过程是:从跟俄罗斯人合作使用其物理部分配合瑞士人自己研制的电器部分到后来将俄罗斯人的物理部分技术引进实现整钟研制。因此它的产品(iMaser3000)与 Vremya-CH 公司的氢原子钟颇为相似,性能指标也跟 VCH1003M 相当,但体积稍显庞大。

国内从事氢原子钟研制的单位有两家,分别是中国航天科工集团二〇三所和中国上海天文台。两家单位均涵盖了主动型和被动型氢原子钟

的研制,且都在售工程化主动型氢原子钟。所不同的是,二〇三所主动氢钟采用一种高 Q 值的蓝宝石介质填充腔,产品体积较小,重量相对最轻。产品基本满足国内用户需求,目前为止已有十余台分别在长河导航台、航空计量所、陆态网、五院总体部、国家授时中心及定位总站等地服役,运行状态良好。目前正在开展高精度氢原子钟的研究工作并于 2014 年底完成项目验收,测试指标不逊于国内传统大氢钟水平,满足国家导航二代地面守时钟指标要求。上海天文台于 20 世纪 70 年代后期开始氢钟的研制,在国内率先研制成功三代氢原子钟:实验室型、实用工程型和小型氢原子钟。迄今为止,实用工程型氢原子钟已批量生产近百台,广泛用于国内“VLBI 网”、卫星定位系统地面站和长波导航等国家重要科学工程项目。其指标在国内领先,但体积、质量及可靠性仍需改进。目前,正在开展氢钟小型化、轻量化研究。此外,上海天文台也于同期完成高可靠性氢原子钟验收,指标达到二代导航所需指标要求。

表 1 和表 2 列出了各国地面用主动型和被动型氢原子钟的主要技术指标。

表 1 各国主动氢原子钟的主要性能指标

Tab. 1 The main indexes of active hydrogen maser

指标	iMaser3000 (T4Science)	VCH-1003M (Vremya-CH)	MHM-2010 (Symmetricom)	SOHM-4 (上海天文台)	BM2101-01 (二〇三所)
稳定度	$1.5 \times 10^{-13}/1s$	$2.0 \times 10^{-13}/1s$	$1.5 \times 10^{-13}/1s$	$4.0 \times 10^{-13}/1s$	$3.0 \times 10^{-13}/1s$
	$2.0 \times 10^{-14}/10^1s$	$3.0 \times 10^{-14}/10^1s$	$2.0 \times 10^{-14}/10^1s$	$7.0 \times 10^{-14}/10^1s$	$6.0 \times 10^{-14}/10^1s$
	$5.0 \times 10^{-15}/10^2s$	$7.0 \times 10^{-15}/10^2s$	$5.0 \times 10^{-15}/10^2s$	$9.0 \times 10^{-15}/10^2s$	$9.0 \times 10^{-15}/10^2s$
	$2.0 \times 10^{-15}/10^3s$	$2.0 \times 10^{-15}/10^3s$	$2.0 \times 10^{-15}/10^3s$	$5.0 \times 10^{-15}/10^3s$	$6.0 \times 10^{-15}/10^3s$
	$2.0 \times 10^{-15}/10^4s$	$1.5 \times 10^{-15}/10^4s$	$1.5 \times 10^{-15}/10^4s$	$3.0 \times 10^{-15}/10^4s$	$4.0 \times 10^{-15}/10^4s$
	$1.0 \times 10^{-15}/Day$	$6.0 \times 10^{-16}/Day$	$1.0 \times 10^{-16}/Day$	$2.0 \times 10^{-15}/Day$	$3.0 \times 10^{-15}/Day$
漂移率	$1.0 \times 10^{-15}/Day$	$5.0 \times 10^{-16}/Day$	$1.0 \times 10^{-15}/Day$	$2.0 \times 10^{-15}/Day$	$3.0 \times 10^{-15}/Day$
复现性	$\pm 1.0 \times 10^{-14}$	$\pm 1.0 \times 10^{-14}$	$\pm 2.0 \times 10^{-14}$	$\pm 3.0 \times 10^{-13}$	$\pm 3.0 \times 10^{-13}$
温度灵敏度/ $^{\circ}C$	$5.0 \times 10^{-15}$	$2.0 \times 10^{-15}$	$1.0 \times 10^{-14}$	$2.0 \times 10^{-14}$	$1.0 \times 10^{-14}$
磁灵敏度/Gs	$1.0 \times 10^{-14}$	$1.0 \times 10^{-14}$	$3.0 \times 10^{-14}$	$1.4 \times 10^{-14}$	$2.0 \times 10^{-14}$
体积/ $mm^3$	600×800×950	550×990×550	107×460×760	540×730×125	570×480×340
重量/kg	150	85	245	200	60
功耗/W	84	150	150	200	60

表2 各国被动氢钟的主要性能指标

Tab. 2 The main indexes of positive hydrogen maser

指标	Spectratime	VCH-1008 (Vremya-CH)	SOPH-1 (上海天文台)	BM2101-03 (二〇三所)
稳定度	$6.0 \times 10^{-13}/1s$	$5.0 \times 10^{-13}/1s$	$1.0 \times 10^{-12}/1s$	$7.0 \times 10^{-13}/1s$
	$2.0 \times 10^{-13}/10^1s$	$2.0 \times 10^{-13}/10^1s$	$4.0 \times 10^{-13}/10^1s$	$2.5 \times 10^{-13}/10^1s$
	$8.0 \times 10^{-14}/10^2s$	$5.0 \times 10^{-14}/10^2s$	$1.3 \times 10^{-13}/10^2s$	$8.5 \times 10^{-14}/10^2s$
	$1.0 \times 10^{-14}/10^3s$	$9.0 \times 10^{-15}/10^3s$	$4.2 \times 10^{-14}/10^4s$	$2.5 \times 10^{-14}/10^3s$
	$9.0 \times 10^{-15}/10^4s$	—	$1.2 \times 10^{-14}/10^4s$	$1.0 \times 10^{-14}/10^4s$
	$4.5 \times 10^{-16}/\text{Day}$	$4.0 \times 10^{-16}/\text{Day}$	$6.0 \times 10^{-15}/\text{Day}$	$7.0 \times 10^{-15}/10^5s$
漂移率	—	$3.0 \times 10^{-15}/\text{Day}$	$5.0 \times 10^{-15}/\text{Day}$	$1.0 \times 10^{-14}/\text{Day}$
温度灵敏度/ $^{\circ}\text{C}$	$5.0 \times 10^{-15}$	$5.0 \times 10^{-15}$	$1.0 \times 10^{-14}$	$2.0 \times 10^{-14}$
磁灵敏度/Gs	$2.0 \times 10^{-14}$	$2.0 \times 10^{-14}$	$2.0 \times 10^{-13}$	$2.0 \times 10^{-13}$
体积/ $\text{mm}^3$	210×470×530	470×200×530	580×500×340	650×350×340
重量/kg	31	33	30	30
功耗/W	60	120	70	60

## 2 空间氢钟最新研制进展

对导航定位精度要求的不断提高及各种现代空间科学实验计划的不断出台推动了空间氢钟的发展。空间氢钟主要是指应用于导航卫星的星载被动氢钟和应用于空间站或空间基础测试系统的高精度主动氢钟。氢原子钟虽然相比较其他实用型原子钟指标最优,但由于商品化研究起步较晚,且实现空间应用的技术相对复杂,即便20世纪七

八十年代在美国和苏联曾掀起过空间氢钟的研究热潮,如表3<sup>[1]</sup>,可遗憾的是这些氢钟也都未曾在轨运行。直到进入21世纪,才由欧洲伽利略导航卫星和俄罗斯射电天文望远镜分别携带星载被动氢钟和高精度主动氢钟,首次实现了主动和被动氢钟的空间在轨应用。可令人惊奇的是,人类历史上最早上天并且一次就发射成功的原子钟竟然是氢原子钟,它是1976年为验证爱因斯坦相对论红移效应而作为有效载荷被发射升空的。

表3 国外研制的用于飞天计划的氢原子钟

Tab. 3 Foreign hydrogen maser designed for space program

种类	尺寸/cm	重量/kg	功耗/W	稳定度
NIST 氢钟	26.7×66×45.5	30	—	$10^{-14}$
STSC 氢钟	$\phi 22 \times 50$	23	50	$10^{-14}$
RIRT 氢钟	$\phi 17 \times 37$	10.5 *	—	$1.5 \times 10^{-14}$
ON 氢钟	$\phi 46 \times 60$	50	60	$1 \times 10^{-14}$
Hughes 氢钟	21.8×21.8×59.7	29.1	64	$7 \times 10^{-14}$
GPS 氢钟	17.8×30.5×43.2	19.5	63	—
SAO 氢钟	$\phi 42.1 \times 83.3$	44	54	$1 \times 10^{-14}$
Eureca 氢钟	$\phi 44.2 \times 86.3$	67	27	$1 \times 10^{-14}$
SAO-HMC	$\phi 50 \times 95$	124.2	42~80	$10^{-15}$
ON-GESNS	18×30×45 (25升)	15	60	$1 \times 10^{-14}$

\* 仅物理部分

最近几年，国际上氢原子钟的研究热潮已转向空间钟的研制并已实现空间应用。Vremya-CH 公司为其国家大科学工程空间射电天文望远镜和 GLONASS 导航系统分别研制了空间主动型氢原子

钟（图 1 左）和星载被动型氢原子钟（图 1 右）<sup>[2]</sup>。前者创造了主动氢钟首次实现在轨空间应用的历史，目前已在轨运行三年多，后者即将服役于 GLONASS 三代导航卫星。

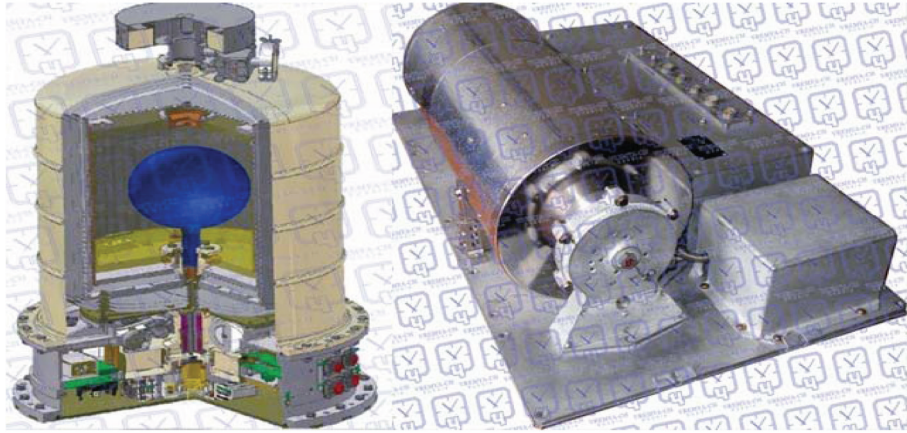


图 1 Vremya-CH 公司研制的空间用氢原子钟

Fig. 1 Space hydrogen maser designed by Vremya-CH

瑞士 Spectratime 公司不仅成功研制地面移动被动型氢钟，而且为满足欧空局 Galileo 卫星定位系统的需要，又成功研制小型化星载被动型氢钟，并于 2008 年随 Galileo 第二颗试验卫星上天，图 2 为它的实物照片。

并进行基础物理测试。

该主动氢钟由瑞士 Spectratime 公司负责研制，项目最开始采用蓝宝石介质填充腔方案，后来由于其腔泡结构温度系数过高且工艺实现难度大便放弃，转而采用传统标准腔泡，目前已完成地面工程样机研制（图 3），目前正处于飞行正样研制测试阶段。



图 2 Galileo 星载被动型氢钟

Fig. 2 Space passive hydrogen maser in Galileo

欧空局的空间站原子钟计划（ACES）<sup>[3-4]</sup>由两台原子钟互锁在一起形成一个原子钟系统，其中一台为激光冷却铯频标，另外一台是标准主动型氢钟，整个钟体预计在 2016 年由无人飞船送入空间站欧洲“哥伦布”实验室的外部载荷平台上，在国际空间站建立当今最高精度的轨道时频基准，

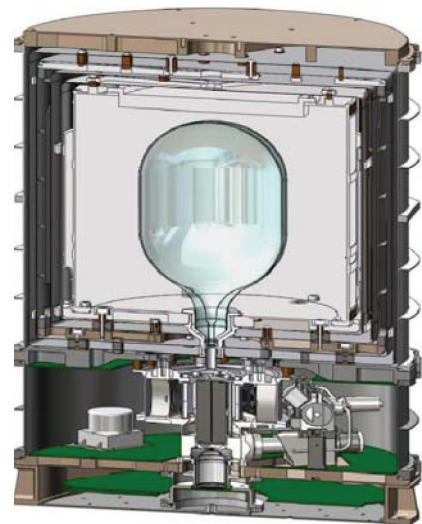


图 3 ACES 中氢原子钟工程样机结构图

Fig. 3 The space active hydrogen maser design overview for ACES

为满足国家导航系统对星载氢钟的需求，中国航天科工集团二〇三所和中科院上海天文台两家单位均开展星载被动小型氢钟的研制工作，并

于2015年5月交付导航总体部参与系统环试。表4给出国外空间氢钟的最新研制水平。

表4 国外空间氢钟的主要性能指标

Tab. 4 The main indexes of foreign space hydrogen maser

指标	GALILEO 用 星载被动氢钟	ACES 用 空间主动氢钟	GLONASS 星载被动氢钟	空间射电望远 镜用主动氢钟
稳定度	—	$1.5 \times 10^{-13}/1s$	$4.97 \times 10^{-13}/1s$	$1.89 \times 10^{-13}/1s$
	$2.0 \times 10^{-13}/10^1s$	$2.1 \times 10^{-14}/10^1s$	$1.56 \times 10^{-13}/10^1s$	$2.85 \times 10^{-14}/10^1s$
	$8.92 \times 10^{-14}/10^2s$	$5.1 \times 10^{-15}/10^2s$	$4.93 \times 10^{-14}/10^2s$	$6.55 \times 10^{-15}/10^2s$
	$2.81 \times 10^{-14}/10^3s$	$2.1 \times 10^{-15}/10^3s$	$1.61 \times 10^{-14}/10^3s$	$2.5 \times 10^{-15}/10^3s$
	$8.85 \times 10^{-15}/10^4s$	$1.5 \times 10^{-15}/10^4s$	$3.8 \times 10^{-15}/10^4s$	$1.92 \times 10^{-15}/10^4s$
	$5.0 \times 10^{-15}/Day$	—	$5.0 \times 10^{-15}/Day$	$4.5 \times 10^{-15}/Day$
漂移率	$1.0 \times 10^{-15}/Day$	—	$1.6 \times 10^{-15}/Day$	$7.7 \times 10^{-15}/Day$
温度灵敏度/ $^{\circ}C$	$2.0 \times 10^{-14}$	$5.0 \times 10^{-15}$	$4.7 \times 10^{-15}$	$4.7 \times 10^{-15}$
磁灵敏度/Gs	$3.0 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-14}$	$9.0 \times 10^{-15}$	$1.9 \times 10^{-14}$
重量/kg	18	40 (物理部分)	22.4	57
功耗/W	70	—	50	52

### 3 氢钟未来技术开发

回顾氢钟发展历程，分析其当前技术发展水平及未来应用需求，氢钟技术开发预期仍有进步空间，作为时间频率标准依然起到并将继续发挥着主力军作用，短期内不可能被取代。分析总结后可以明确未来氢钟的主要技术开发方向为：空间应用所需的小型化、轻量化设计和技术不断创新驱动下的高性能指标研究。

#### 3.1 氢钟小型化、轻量化设计

传统氢钟整体较为庞大、笨重，一定程度上限制了它的应用领域。尤其近几年掀起的空间探索与应用热潮，推动了氢钟小型化、轻量化设计发展。

腔泡组件尺寸、磁屏蔽组件、束光学组件、真空及温控结构组件等都是决定氢钟小型化、轻量化的关键因素。腔泡作为氢钟的核心量子组件，其小型化设计决定着整钟的大小和重量，腔泡组件的减小使氢钟磁屏蔽、真空结构件等大质量组件的小型化、轻量化设计成为可能。

欧空局组织研制的质量仅为12kg的mini被动

氢钟<sup>[5]</sup>就得益于其磁控管微波腔设计尺寸较之前的18kg减少30%，在各组件优化设计后，整机质量减少30%以上（图4）。

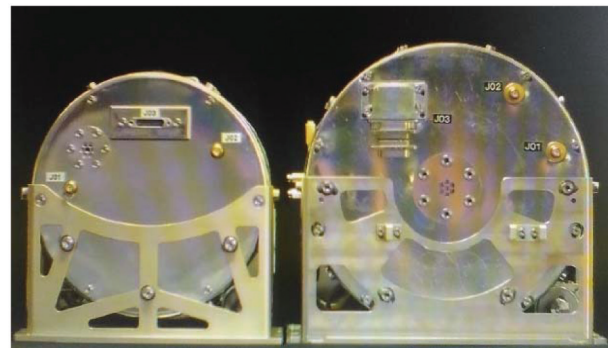


图4 瑞士星载氢钟12kg与18kg对比

Fig. 4 Space passive hydrogen maser of 12kg vs 18kg

瑞士研制的空间主动氢钟是目前世界上体积和质量(35kg)<sup>[6]</sup>均最小的氢钟，同时其测试指标不逊于国内传统标准腔主动氢钟。其轻便的小型化设计采用一种高Q的蓝宝石介质腔填充，体积仅为传统标准腔的1/3。中国航天科工集团二〇三所地面蓝宝石主动氢钟质量仅为60kg，性能指标与国内传统标准腔主动氢钟指标相当。

### 3.2 氢钟高性能关键技术

高频率稳定度、低漂移率及良好的相位噪声是氢钟的优质特性。诸如国家守时系统、基础科学研究等领域，对高性能氢钟需求迫切。

俄罗斯 Vremya-CH 公司为该国太空观测台“Millimetron”（项目“Spectrum-M”）研制的新一代高稳定度主动氢钟设计指标分别为： $7 \times 10^{-13}/1\text{s}$ ； $2 \times 10^{-15}/10^2\text{s}$ ； $8 \times 10^{-16}/10^3\text{s}$ <sup>[7]</sup>。这一极具挑战性的中短期稳定度指标已打破传统氢钟的理论极限，是基于新理论下通过开展有效限制氢原子钟自旋交换对原子辐射功率及线 Q 的影响来实现这一目标。工程上采用的方案是研制一种双选态量子组件取代传统氢钟单选态器，以有效提高氢原子辐射功率及线 Q，实现氢钟频率稳定度的再提高。另据文献 [11] 介绍，欧空局属下研究机构也在开展上述关键技术攻关。

氢钟长期稳定度与漂移率是密切相关的两个指标。氢稳流技术、储存泡膜老化特性、温度敏感度、磁敏感度及量子组件老化机制等是限制氢钟上述指标的关键因素。

为了削弱氢流量波动对氢钟长期稳定度及漂移率带来的影响，瑞士氢钟设计了如图 5 所示的氢流量控制组件。经镍管提纯后的氢气压力数值可以通过热真空计测得，该数值转化成电学信号反馈到氢瓶温控电路中，当镍管输出氢气压力偏离设定值时，控制系统就会通过改变氢瓶加热功率来弥补压力变化，从而实现对氢气流量的平稳控制。

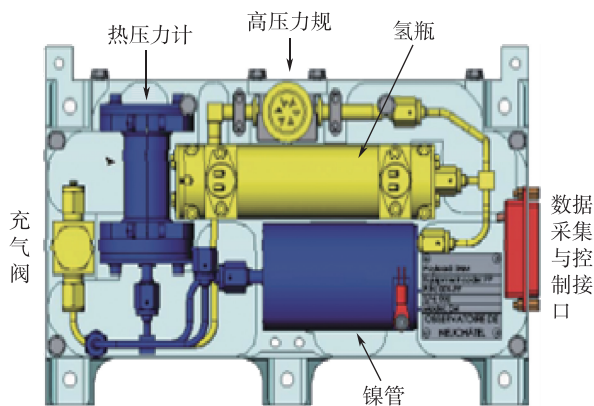


图 5 瑞士空间主动氢钟的氢稳流设计

Fig. 5 Hydrogen flux system for space hydrogen maser

俄罗斯氢钟储存泡采用一种“F10”的涂覆液<sup>[8]</sup>有效降低氢钟壁移效应，且具有良好的老化特性，这对氢钟准确度评估、长期稳定度的改善及低漂移率有显著贡献。

俄罗斯采用新型低膨胀系数复合材料研制的微波腔温度系数小于  $100\text{Hz}/^\circ\text{C}$ ，配合低噪声、高对称性数字伺服环路实现优于国内一个数量级的温度敏感度。采用特殊热处理工艺制备的磁屏蔽组件所能达到的磁屏蔽效能（3层 10万）超出国内 2 倍之多。这都是关系氢钟中长期稳定度及漂移率的关键性能指标。

氢钟的低相位噪声在 VLBI 系统应用中尤为重要，采用性能优异的本振可有效改善氢钟相位噪声水平。如俄罗斯及瑞士氢钟采用 BVA8607 本振获得良好的低相位噪声，国内氢钟采用 BVA8607 本振配合二次锁相技术也有效降低了相位噪声，同时短期稳定度也有显著改善。

国外有的实验室为打破传统氢钟指标的理论极限，曾开展过冷冻氢钟的实验，即让脉泽工作在冷冻条件下（认为工作温度 10K 最佳）。“低温”为高频谱纯度和高稳定度的新型频率标准提供了光明的前景。工作于温度低于几 K 的冷冻氢脉泽与室温下的氢脉泽相比，由于热噪声低，氢原子自旋交换弛豫率降低，以及工作信号功率增高，其频率稳定度可提高 2~3 个数量级。

## 4 结论

当前，俄罗斯氢钟技术发展水平引领国际潮流，欧美氢钟发展战略各有侧重。同国外氢钟发展水平相比，我国氢钟技术总体落后，需要追赶。国内氢钟频率稳定度及漂移率较国外有近一个量级的差距，虽然能满足部分领域的需求，但对于诸如国家二代导航系统地面站、国家守时中心和基础科学研究等领域，更高精度的国产氢钟仍有不足。此外，长期可靠性也与国外水平存在差距。从当前国情及国际形势来看，氢钟在我国未来的发展定位应着眼于满足国家战略需求、着眼于服务国内甚至国外市场需求、着眼于追赶国外氢钟最高发展水平。

### 参考文献

- [1] 刘铁新, 翟造成. 空间导航定位与空间原子钟[J]. 全球定

- 位系统, 2002, 2: 7-17.
- [2] A Utkin, A Belyaev, Y Pavlenko. On-board active hydrogen maser for Radioastron mission [C]. 6th International Symposium "Metrology of Time and Space", Russia, Aug 21-23, 2012.
- [3] S Feltham, G Gianfiglioli, F Reinal. ACES: A time and frequency mission for the international space station [C]. 18th European Frequency and Time Forum, Guildford, England, April 5-7, 2004.
- [4] D Goujon, P Rochat, P Mosset, et al. Development of the space active hydrogen maser for the ACES mission [C]. IEEE Europe Frequency Control Symposium, America, April 13-16, 2010.
- [5] Pascal Rochat, Qinghua Wang, Fabien Droz. GNSS on-board atomic clocks ensemble & space active maser [C]. 4th China Satellite Navigation Conference, Wuhan, May 15-17, 2013.
- [6] Zivanov S, Schweda H, Goujon D, et al. Physics package of the 35kg space active hydrogen maser for the ACES space mission of ESA [C]. IEEE International Frequency Control Symposium, Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, Geneva, June 4-7, 2007.
- [7] A Belyaev, N Demidov, S Medvedev, et al. The activities of "Vremya-CH" JS company (Russia) in developing of active and passive hydrogen masers for ground and space applications [C]. 4th China Satellite Navigation Conference, Wuhan, May 15-17, 2013.
- [8] A Belyaev, N Demidov, S Medvedev, et al. Russia hydrogen masers for ground and space applications [C]. 6th China Satellite Navigation Conference, Xi'an, May 13-15, 2015.