

上海天文台原子频标研究 50 年

翟造成

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

提 要

中国科学院上海天文台 1958 年开始原子频标的研究,先后研制成功氨分子钟和各种类型的氢原子钟,并实现主动型氢钟的商品化生产。迄今为止,已经研制生产主动型氢钟 60 多台,广泛用于科学技术各领域。该文简单介绍了上海天文台原子频标的发展、性能指标的改进和氢钟的应用概况,并对今后的发展前景进行了展望。

主题词: 原子频率标准 — 氢钟 — 性能

分类号: TH714.1⁺4

1 引 言

许多世纪以来,人类测量时间的标准是天体的视运动。随着生产力的发展和科学技术的进步,人们对于时间精度的要求越来越高。例如人造卫星发射、导弹制导、运动目标的精确定位、空间技术、深空跟踪以及现代天文学、基础物理学测试等领域,不仅要求时间标准具有很高的准确度,而且要求它们具有优良的稳定度。以天体视运动为基础的世界时很难满足这些应用需要。因此,为了提高计时精度,很久以来人们便在探索新的时间测量标准。

1954 年前后,美国的唐斯(C. Townes)和中国的王天眷等人首先利用分子的受激辐射原理,制成世界上第一台氨分子振荡器。由于它的成功,致使在科学领域内出现了一门崭新的边缘学科——量子电子学。这种量子电子学器件具有极优秀的特性:作为振荡器,它的噪声系数几乎等于 1,放大微弱信号而不带来噪声;作为振荡器,由于它的振荡频率极为单色,并且稳定度极高,而且可以不依赖其它标准实现频率的再现,因而为时间(频率)提供了更高级的标准——原子频标或称原子钟。

氨分子钟出现后,半个多世纪来,利用分子、原子等某些固有特性的研究十分活跃,世界各国先后研制出大量性能优异的各类原子钟,如铯原子钟、氢原子钟、铷原子钟等,特别是铯原子钟的出现,由于它的准确度极高(当时已是 10^{-15}),使时间的计量精度出现了一个飞跃,导致国际上将时间单位秒长定义为铯原子(Cs^{133})基态超精细跃迁振荡的 9192631770 个周期所持续的时间。原子钟的出现是人类计时史上的一次革命,它使时间测量标准从此由传统的天文学宏观标准扩展到物理学的微观标准,使人类的时间测量和守时工作进入了一个崭新的历史阶段。

从 20 世纪 50 年代以来,差不多四分之一世纪,我国的授时中心设在上海天文台,承担着

我国标准时间和标准频率的发播任务,但当时的守时设备仅为从西德进口的电子管 CAA 石英钟。为了提高授时精度,理应具备先进的守时标准。于是,上海天文台于 1958 年开始研制原子钟,并首先从当时刚问世不久的氨分子钟开始。此后为满足天文研究及其它领域的需求,又研制成功了各种型号的氢原子钟。本文将概述上海天文台 50 年来原子频标的研制、性能指标的改进以及这些原子钟的应用情况。

2 我国第一台原子钟的诞生

为了提高授时精度,上海天文台率先在我国开始了氨分子钟的研制。研制氨分子钟至少有三个难点必须突破,一是高真空系统的建立;二是高 Q 值微波谐振腔的制作和正确频率的确定;三是波导管和接收机的制作。这些在中国当时的工业水平,无任何现成材料可以购买,各个难点都要由研制人员摸索克服,真空度仅需 10^{-6} 毫米水银柱的真空系统,也要用一人多高的油扩散真空泵来抽空。氨分子 23GHz 这样高的微波振荡频率,要求 1.25cm 的方型波导管传输,国家当时无此波导元件,上海天文台研制人员用低熔合金做成模子,用电解法将铜沉积在模子上,达到一定厚度后,将模子熔化后形成波导管。23GHz 的微波谐振腔就更难制作了,腔膛的光洁度要求很严,而且径向要无椭圆度,轴向无锥度,谐振频率还要保证正确,并要保证腔的 Q 值达 50000。这是一个很大的难题,上海天文台的一个 8 级老师傅,经多方试验,精工细作,最后采用绿油抛光内膛的办法才得到解决。以至于世界上第一台氨分子钟创始人之一——中国学者王天眷先生 1962 年回国后到上海天文台氨分子钟实验室参观指导时,看到中国人自己制造出这么好的微波谐振腔,连声称赞并发出感叹“中国能造成氨分子钟”。就这样,在上海天文台氨钟实验室里,科技人员排除万难,中国第一台原子钟——氨分子(3,3 线)分子钟于 1964 年终于诞生^[1],跻身于世界上拥有原子钟的国家之列。图 1 为上海天文台研制的第一台氨分子钟结构图和原型照片。束源采用多管道喷口。在直径 6mm,长 5mm 的管道内均匀分布了 50 根直径 0.5mm 的细管道;聚焦器为四极极杆式电极,螺距 3mm,内径 6mm,长 150mm,谐振腔内径 9.61mm,长 100mm, Q 值为 40000。

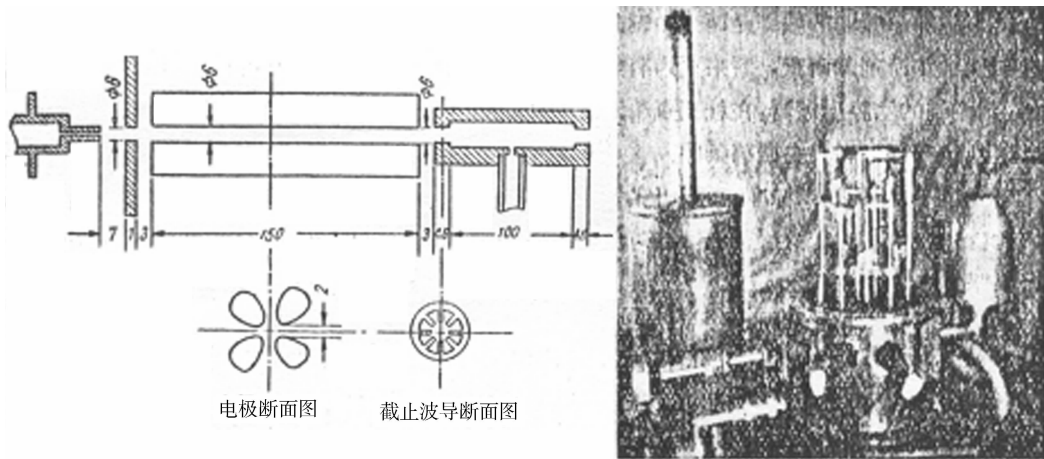


图 1 上海天文台研制的第一台氨分子钟

Fig. 1 The first ammonia maser developed in Shanghai Astronomical Observatory (SHAO)

氨分子钟在上海天文台实验室试制成功后,准备试生产,扩展应用。于1972年试生产了四台新型氨分子钟。两台用于上海天文台时频发播系统,另两台用于陕西天文台的时频发播系统。图2为这种新型氨分子钟在系统中工作的照片^[2]。其准确度为 1×10^{-9} ,稳定度为 10^{-11} 。



图2 上海天文台生产的氨分子钟

Fig. 2 The ammonia molecular clock produced in SHAO

由于国际上其它种类的原子钟问世,并且其性能指标均比氨分子钟优越,所以低精度的氨分子钟在国际上陆续停止了精密化研究。我国氨分子钟的研究也是如此。上海天文台和陕西天文台使用的这四台氨分子钟,由于其它原子钟的引入,约于1975年左右停止了使用。其中

的一台曾在上海自然博物馆展出。

继氨分子钟后不久国际上又出现铯、氢、铷等各种原子钟,其性能均好于氨分子钟。上海天文台在氨分子钟研制过程中,也同时对氢原子钟的国际研究动态及进展进行了关注和调研,以期在适当时机开展更高精度的氢原子钟的研制工作。

3 我国第一台氢原子钟的研制

图3为上海天文台研制的我国第一台氢原子钟的样机照片。1970年上海天文台成立了氢原子钟研制组,开展了氢原子钟的试制工作。氢原子钟的研制工作是一项涉及面广,工艺要求高,难度较大的综合性研究课题,有些工艺和技术还是国内第一次使用,如大面积石英涂银、抽超高真空用的无油冷钛离子泵等,



图3 上海天文台研制的我国第一台氢原子钟样机

Fig. 3 The first domestic hydrogen atomic clock developed in SHAO

就是氢钟研制任务提出后才同时着手研究的新技术。上海天文台与有关单位协作,从 1970 年初开始设计、研制,经过 2 年多时间的反复试验和兄弟单位的共同努力,于 1972 年终于获得氢原子振荡,使我国氢原子频标在上海天文台首先研制成功^[3]。标志着我国原子频标事业的一大进步,同时也标志着我国超高真空钛离子泵技术以及大容积石英腔烧结和有机塑料非金属涂敷等新工艺的一大进步。

上海天文台在氢原子钟样机试制成功的基础上,对原设计进行了改进与提高,重新研制了改进型氢钟,于 1978 年投入使用,并在此基础上建立了我国第一个单台站原子时尺度。图 4 为当时上海天文台投入使用的氢钟。



图 4 上海天文台实验室型氢钟

Fig. 4 SHAO's experimental hydrogen atomic clocks

上海天文台氢钟在使用中不断改进提高,1979 年以后,对现有氢钟的机械结构和电子学系统作了多次重要改进^[4],例如缩短了原子束光学系统,并在磁态选择器出口加阻挡珠,使光学系统更为有效;改进了腔-泡结构,消除机械应力和气压变化所致的腔频率变化,增加了腔-泡结构的机械稳定性;同时调整输出耦合,使腔 Q 值大大提高。并且输出端增加隔离度以降低外电路对腔频的影响,改善了氢激光器的热稳定性。由于以上这些改进,使氢钟的质量标准大大提高,其稳定度指标分别为: $(2 \sim 3) \times 10^{-13}/s$, $4 \times 10^{-14}/10s$, $3.6 \times 10^{-14}/100s$, $1.2 \times 10^{-14}/h$ 和 $5 \times 10^{-14}/d$,将其用于国内 VLBI 实验以及建立原子时尺度都获得成功。此外,还用于七机部、四机部、国防科委等有关单位鉴定测试其它频率标准设备。上海天文台的氢钟获得 1978 年全国科学大会和上海市重大成果奖,并与上海计量局一起获得 1985 年国家科技进步二等奖。

上述实验室型氢原子钟,其体积之大,重量之重堪称“庞然大物”,只能在实验室条件下应用。这种氢原子钟,虽已在不同领域的使用中发挥了一定作用,但由于笨重和使用繁杂,性能也不尽如人意,工作不稳定。随着实用型氢钟的问世,这些实验室型氢钟便相继不再使用。

4 实用型氢原子钟的研制

为了使氢原子钟成为实用标准,满足当时天文学新技术研究的需要,上海天文台继续新型氢原子钟的研制与改进,并于 20 世纪 80 年代初分别派员赴美、日研修,参考国外的先进设计

结合我国的实际情况,于1985年着手研制工程化实用型的新一代氢原子钟,并于1987年研制成功^[5,6],其实测稳定度指标分别为 $2.7 \times 10^{-13}/s$, $4.05 \times 10^{-14}/10s$, $8 \times 10^{-15}/100s$, $9.0 \times 10^{-15}/4000s$ 。1988年中国科学院组织以王天眷、陈芳允、王义遒等老科学家为首的鉴定委员会对其进行了鉴定。其鉴定意见为:“上海天文台实用型氢激射器频标是在总结我国研制这类频标的长期经验和借鉴国外先进技术的基础上,运用新工艺,重新进行周密设计,研制成的新成果,它结构紧凑,物理和电器部分组成一体,可整体搬运,便于操作;该频标的稳定度指标已跨入国际上同类型频标的先进行列。鉴定委员会认为这个成果提高了我国的原子钟研制水平。鉴定委员会决定该成果通过中国科学院院级鉴定”。该成果获1989年中国科学院科技进步二等奖。这是一种完全不同于先前实验室型氢原子钟的设计,是一种体积较小,可整体搬运的实用型氢原子时频标准。这种标准的显著特点是,它的物理部分和电气部分集成为一体,放在单一标准机箱中(实验室型氢钟中两者是分开的),重150kg,高1.1m,适合于卡车、火车及飞机等各种运输工具整体运输。设计充分考虑到内在机械稳定性和热稳定性,采用了许多关键技术:

(1) 谐振腔-原子储存泡系统采用碟形弹簧和漂浮基板,结构紧密、坚固,为类实体结构,它有效地消除了热膨胀效应和大气压变化效应所引起的腔-泡组件的应力变形,保证了氢钟的稳定性。

(2) 其物理部分采用锥形磁屏蔽,有效地消除了局部应力效应,大大改善了屏蔽效果。

(3) 采用了产生C场的轻型多层印刷线路线圈,有效地消除了杂散磁场的影响。

(4) 腔-泡结构的恒温系统采用分区热控制,有效地消除了温度梯度。

(5) 氢钟的关键部分——原子振荡器在整机中采用了特殊防震设计以适应野外流动使用的需要。

图5为我国第一台实用型氢原子钟的实物照片。该台氢钟从20世纪90年代初开始就在中国VLBI网佘山工作站使用。1998年经历一次复活改造后,连续工作至今,仍在继续使用。



图5 我国第一台实用型氢原子钟

Fig.5 The first domestic applied hydrogen atomic clock

5 实用型氢钟的改进与批量生产

实用型氢钟的研制成功,满足了装备中国VLBI网和计量、守时、通信、导航定位等领域的需要。上海天文台实用型氢钟在研制过程中不断改进,以满足各领域对稳定度和可靠性的高要求^[7,8]。近10年来,对实用型氢钟的设计进行了重要改进,同时增加了腔频自动调谐功能,有效地消除频率的热漂移,保证频率准确度的高度复现和氢钟的长期稳定度。20多年来,先后批量研制生产了60多台实用型氢钟投入实际使用^[9],为相关的国家重要工程项目和科学试验项目做出了积极的贡献。由于产品的性能指标先进,使用效果不错,曾获国家和中国科学院多项科技进步奖,并获国防科工委司令部的多次嘉奖。这种实用型标准在上海天文台目前仍在继续研制生产以满足国家重要需求。

目前,实用型标准的性能指标:稳定度为 $(2 \sim 4) \times 10^{-13}/s$, $(5 \sim 8) \times 10^{-15}/d$,准确度为 5×10^{-13} 。图 6 为最近批量生产的这种实用型氢钟的实物照片。



图 6 实用型氢钟整装待发

Fig. 6 SHAO's applied hydrogen atomic clocks which are ready for delivering

6 氢钟小型化

上海天文台的氢钟在电气技术指标上虽已达到较高的水平,并且实现了批量生产,但由于体积大和重量重,严重影响了它在相关领域的应用。因此,研制出小型化氢钟是我国发展时频事业的迫切需要。

以上海天文台生产的 SOHM-4 型氢原子钟为例,传统的主动型氢钟的微波谐振腔体积较大,加上磁屏蔽结构、真空系统、伺服电路等,它的总重量达到 150kg,总体积有 540mm × 740mm × 1110mm。而惠普公司生产的 5071A 型小铯钟重量仅 30kg,体积为 524mm × 426mm × 133mm。这样氢钟虽然有着很高的频率稳定度,它的体积和重量却限制了它在某些领域的应用。目前氢钟的小型化已成为氢原子频标的发展方向之一。氢钟的小型化主要是谐振腔的改进,它的结构尺寸决定了氢钟的最小尺寸和重量。目前采用的小型腔主要有电极负载腔、磁控管型腔、介质负载腔和 TE111 模式腔。新型的谐振腔虽然减小了体积和重量,但是由于它 Q 值低很难满足起振条件,所以其伺服电路上必须不同于主动型氢钟。根据电路原理的不同,将小型化的氢钟分为反馈振荡型和被动型。反馈振荡型氢钟使激光器工作在反馈振荡状态,通过正反馈维持激光器振荡。被动型氢钟的激光器工作在振荡阈值之下,其作用与谐振放大器相似。

6.1 反馈振荡型小氢钟

上海天文台 1989 年开始反馈振荡型小型氢钟的研制。设计了体积小的电极负载谐振腔,探索了不同种类小型谐振腔模式和与之相匹配的接收-锁相电路、腔自动调谐电路。1994 年获得反馈振荡信号并成功实现闭环锁定,最后研制成功了反馈振荡型小氢钟^[10]。图 7 为它的

实物照片。该小氢钟的准确度为 10^{-12} , 稳定度为 $3 \times 10^{-12} \text{s}$ 。

反馈振荡型(或称 Q 增强型)氢原子钟由于其工作机理决定了它对环境条件的敏感性,所以研制产品的应用都不够理想。

6.2 被动型小氢钟

被动型氢钟的物理部分与主动型氢钟相似,所不同的是采用了小型化谐振腔,由于小型腔 Q 值低而不能实现原子振荡,在此种情况下,物理部分仅作为鉴频器使用。被动型氢钟的难点在于它的电子学部分,它需两个回路:一个为晶振,将振荡频率锁定在原子谱线;另一个为腔频,将振荡频率锁定在晶振上。问题的关键是要考虑如何避免两个回路的干扰和采用怎样的调制模式。

上海天文台于 20 世纪 90 年代后期开始被动型小型氢原子钟的研制。其物理部分沿用曾经成功用于反馈振荡型小型氢钟的那套系统,只不过此时让其工作在被动状态,用作量子鉴别器用,配



图 7 反馈振荡型小氢钟

Fig. 7 SHAO's miniature hydrogen atomic clock with Q - enhanced

以被动工作机理下的电子线路。2000 年底被动型小型氢原子钟在上海天文台试验成功,实现了对晶振和腔频两个环路的锁定。初步测试表明,其性能指标与 HP5061A 小铯钟的水平相当。稳定度为 $1 \times 10^{-11}/1\text{s}$, $1 \times 10^{-12}/100\text{s}$, $2 \times 10^{-13}/\text{h}$ 和 $10^{-14}/\text{d}$ ^[11]。图 8 为它的样机与实用型氢钟的比较。

在国家项目的支持下,于 2003 年开始新一轮小型化被动型小氢钟的进一步研制,并进行了全新的设计,物理部分采用双真空系统设计,研制了小型类磁控管腔以及四极态选择原子束光学系统;并且设计和研制了分时调制数字化回路电子系统。这些全新的独特设计均具有很强的实用价值,为提高产品的性能做出了贡献。新型被动型小氢钟于 2005 年完成,并通过了专家组的验收。该小型氢钟的性能指标:频率稳定度为 $2 \times 10^{-12}/\text{s}$, $2 \times 10^{-13}/100\text{s}$, $(1 \sim 2) \times 10^{-14}/\text{d}$;频率准确度为 1×10^{-12} ,重量为 30 kg。该种小氢钟研制了四台,图 9 为其实物照片。目前,其中两台仍继续在某计量单位运转,监测其长期性能。当前,上海天文台正在开展下一轮的更小型被动型氢钟的设计与研制。



图 8 被动型小氢钟样机与主动型氢钟的比较

Fig. 8 The comparison between active and passive H-clocks developed in SHAO

7 今后的发展

随着国家对氢原子钟的需求的不断增加,上海天文台将毫无疑问继续氢钟的研制与生产。随着需求的多样化,我台氢钟的发展,除继续改进提高性能指标及可靠性外,为满足国家各种重要战略需求而研发新品,已势在必行。

7.1 现有产品的改进与提高

我台实用型氢钟虽已获得广泛应用,并产生相当不错的使用效果,但是它们的性能指标及可靠性与国外同类产品相比,仍有差距,需要继续改进与提高。对现有氢钟的分析显示,拟采取下述改进措施:① 严格工艺和参数调整,以避免内部杂乱干扰的产生;② 锁相接收机的再设计,以期提高短期稳定性和频谱特性;③ 改进恒温系统以提高温控精度;④ 腔频自动调谐系统的再设计,以提高长期稳定性和减小频率漂移。这些措施将从根本上减小氢钟的整体温度系数,改善长期性能指标。

7.2 星载被动型氢原子钟的研制

在新型被动小氢钟的基础上,进一步改进设计,设计研制小型新型磁控管型谐振腔,轻型吸附真空泵正式用于量子部分的真空系统,研制全新数字化电路,以进一步减小被动型小氢钟的重量,预计整个小氢钟重量将小于 25 公斤,稳定性指标也将有所提高,以期满足国家重要战略需求。

7.3 空间主动型氢原子钟的研制

随着探月工程,空间 VLBI 以及火星探测、深空跟踪和现代基础物理测试等科学试验,都需要 10^{-15} 稳定性甚至更好的空间原子时频标准。综观国内外的相关研究,作为高稳定度的空间应用,主动型氢钟最为可行而成为首选。如欧盟 ACES 飞行计划中就计划将 35kg 的主动型氢钟与冷铯原子钟锁在一起,于 2010 年在国际空间站建立当今最高精度的轨道时频基准,并进行基础物理测试。俄罗斯也在积极开展主动型空间氢钟计划。上海天文台主动型氢钟有很好的基础,并有被动型氢钟小型化的经验,积极开展主动型空间氢钟的研制,必然有着很好的应用前景。

7.4 其它有前途的工作

7.4.1 地面被动型小氢钟

在实验室新型被动型小氢钟成功的基础上,改进成地面应用的小型氢频标,批量生产以满足精度要求不太高的用户,将有很好前景。

7.4.2 “蓝宝石”小型主动型氢钟的研制

采用蓝宝石谐振腔,可实现主动型氢钟的小型化,其重量可望只有 50 kg。凭借上海天文台大氢钟的成功设计准则和研究经验,研制小型化的蓝宝石腔主动型氢钟应该问题不大。目前国内已有蓝宝石腔的成功生产。研制出主动型小型氢钟,以满足地面用户的需求也必然具



图 9 新型被动型小氢钟

Fig.9 SHAO's new type of passive hydrogen clock

有很好的应用前景。

7.4.3 先进的频标电路的研发

总结国内外原子频标研究的经验和教训可以看到,在物理部分已相当详尽地精益求精后,目前原子频标的性能指标很大程度上依赖于电子线路的设计,好的电路(包括数字化)的设计,对提高原子钟的性能尤其重要。我台氢钟工作应该加强与之配套的电子学研究力量,应该专注研究国外原子钟电子线路的先进技术,研发先进的频标电子技术,以期更新目前氢钟的电子系统,提高我台氢钟产品水平。

8 结 束 语

原子钟对科学技术的发展起着重要的作用,已经成为国家现代化重要项目的战略需求。上海天文台氢原子钟产品已获国内广泛应用,有着很好的基础。我们应该进一步拟定规划,在巩固已有成绩的基础上,继往开来,不断研发新品,不断进取,使今后我台氢钟的研制工作更上一个新台阶,为满足国家不断增长的需求,更好地做出新的贡献。

参 考 文 献

- [1] 程述铭, 万同山, 张延林. 科学仪器, 1964, 3(1): 26
- [2] 氨分子钟组. 天文参考资料, 1973, (4): 1
- [3] 原子频标组. 中国科学院上海天文台年刊, 1979, 1: 106
- [4] 原子频标组. 中国科学院上海天文台年刊, 1983, 5: 227
- [5] 翟造成, 黄亨祥, 江国兴等. 中国科学院上海天文台年刊, 1989, 10: 218
- [6] 翟造成, 林传富, 黄亨祥等. 中国科学院上海天文台年刊, 1990, 11: 203
- [7] 张为群, 林传富, 彭继兴等. 量子电子学报, 2001, 18(1): 70
- [8] 彭科, 张燕军, 张为群等. 时间频率学报, 2004, 27(1): 41
- [9] 翟造成. 中国科学院上海天文台年刊, 2001, 22: 127
- [10] 翟造成, 林传富等. 计量学报, 1994, 15(4): 276
- [11] 林传富, 刘铁新, 翟造成等. 计量学报, 2003, 24(1): 69

THE ATOMIC FREQUENCY STANDARDS RESEARCH AT SHANGHAI ASTRONOMICAL OBSERVATORY IN 50 YEARS

ZHAI Zao-cheng

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

Shanghai Astronomical Observatory has developed atomic frequency standards since 1958. Ammonia maser and various kinds of hydrogen atomic clocks have been developed successfully. And the active hydrogen atomic clocks have been realized commercial productions. So far, more than 60 active hydrogen atomic clocks have been built in Shanghai Astronomical Observatory, and they have been used widely in the Scien-Tech fields. This paper introduces briefly SHAO's atomic frequency standards developments, the improvements of their performance specification and their applications. The developing future of atomic clocks in SHAO is also pointed out briefly.

Key words atomic frequency standard — hydrogen atomic clock — performance