

氢原子频标的小型化

刘铁新¹ 高俊法² 翟造成¹

(1. 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2. 中国科学院陕西天文台 临潼 710600)

摘 要

小型化是目前氢钟的发展方向之一。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、磁控管腔、介质负载腔和 TE111 腔。新型的谐振腔虽然减小了体积减轻了重量,但是由于它本身已经很难满足起振条件,所以在伺服电路上也不同于主动型氢钟。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。

关键词 氢钟: 小型化 — 谐振腔 — 反馈振荡型 — 被动型

分类号: TH714.14

1 引 言

时频技术在导航定位、基站的时间同步、通讯网的时间同步等领域有着广泛的应用。现代科学技术的发展向时频技术提出了更高的要求。高精度的原子钟是建立时频系统的基础。常用的原子钟有三种:铯钟、氢钟和铷钟。铯钟的体积小,长期稳定度好。铷钟的体积很小,但是它的性能略差,是二级频率标准。氢钟有着无法比拟的很好的短期稳定度,它可以用于守时,也可以作为对时间要求很高的 VLBI(甚长基线干涉)试验中的时间标准^[1]。

传统的主动型(有源型)氢钟的微波谐振腔体积较大。以上海天文台生产的 SOHM-III 型氢原子钟为例,加上磁屏蔽结构、真空系统、伺服电路等其总重量达到 150kg,总体积有 540mm×740mm×1110mm。而小铯钟(以惠普公司生产的 5071A 型小铯钟为例)的重量仅 30kg,体积为 524mm×426mm×133mm。这样氢钟虽然有很高的频率稳定度,它的体积和重量却限制了它在一些领域的应用。目前氢钟的小型化成为氢原子频标的发展方向之一。

在卫星导航定位系统中, 1ns 的时间误差会引起 0.3m 的定位误差。如果钟造成的位置误差要保持在 1.5m 以内, 钟在 1d 中的频率稳定度需好于 6×10^{-14} 。如果钟具有较好的频率稳定度, 它需要控制的次数可以减小, 并且为系统性能的再提高提供了余量^[2]。所以氢钟的小型化不仅为地面的应用提供了方便, 而且为星载氢钟的发展提供了基础。

2 谐振腔的小型化

氢钟的小型化可以从谐振腔、束光学系统、真空泵等几个方面考虑; 其中最主要的是谐振腔的体积和重量。所以氢钟的小型化首先要考虑的是设计出小的谐振腔, 它的结构尺寸决定了氢钟的最小尺寸和重量。传统的主动型氢钟采用 TE₀₁₁ 模式谐振腔。共振在氢超精细跃迁频率 1.420406GHz 的典型 TE₀₁₁ 谐振腔的直径、长度均约为 28cm^[3]; 它限制了氢钟的体积和重量。需要考虑既能够满足与氢超精细跃迁频率共振又能减小体积

的其他结构的小型腔。国内外不同的研究实验室为了实现氢钟的小型化提出了采用其他结构的小型腔。目前常用的小型腔有以下三种类型:

(1) 电极负载腔

在圆柱形金属腔或内壁涂银的石英腔内, 四块金属电极用低损耗环氧树脂等间距地粘在储存泡上, 构成负载结构, 如图 1(a) 所示。选择电感电极和其间电容缝隙尺寸以得到所需的腔的谐振频率。这种腔的损耗主要取决于电极的阻抗损耗。电极片选用高导电率材料, 如银或高导无氧铜。电极负载腔的设计较为灵活, 如美国 Sigma Tau^[4,5] 公司提出的几种设计, 腔的尺寸从 $\Phi 16.8\text{cm} \times 28\text{cm}$ 到 $\Phi 6.4\text{cm} \times 11.2\text{cm}$, 它们的有载品质因数 (Q_1) 值是 16800 ~ 4100。

俄罗斯无线电导航和时间研究所 (RIRT) 和俄罗斯的 KVARZ 公司采用一种磁控管型圆柱形腔^[6,16], 如图 1(b) 所示。这种腔的结构可确保机械稳定性, 比电极负载腔的结构

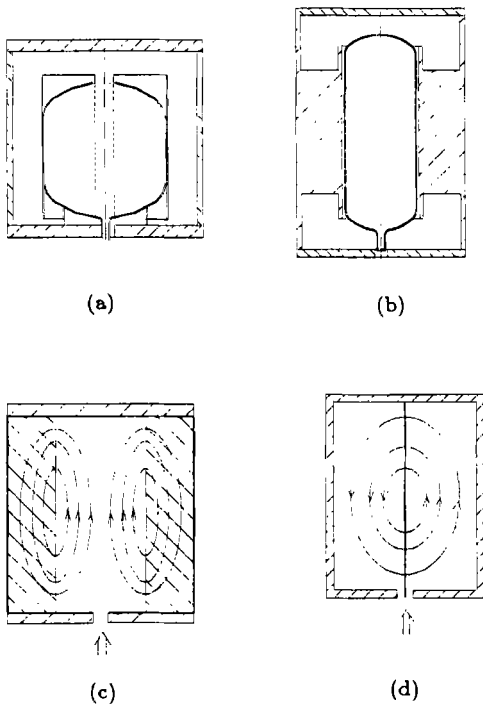


图 1 被动型氢钟的谐振腔
更适合星载氢钟应用。

(2) 介质负载腔

用高介电常数和低损耗正切的材料填充腔, 如单晶蓝宝石和绝缘陶瓷^[7], 如图 1(c) 所示。介质圆柱体的中央轴线部分为原子储存区域, 外壁镀银作为金属圆柱体以限制电磁场。由于大块的介电材料腔的质量较大。腔的尺寸是由介质的特性决定。这种腔在设计上没有电极负载腔灵活。由于介质材料的影响它的温度系数较大。

(3) 隔膜腔

史密松天体物理台 (SAO) 的 Vessot 和 Mattison 等人提出采用一种有载品质因数 (Q_1) 较大的新型 TE111 无泡谐振腔^[8]，如图 1(d) 所示。这种腔的尺寸约为传统 TE011 谐振腔的一半，腔泡合一，结构简单。上海天文台曾经做过试验，进行了感应辐射的观测^[9]，这种腔的应用还有待于进一步的试验研究。

除了谐振腔是氢钟小型化的关键外，对氢钟体积重量影响较大的是真空泵。目前已经在小型氢钟上用锆-石墨吸气泵和小型离子泵组成的轻小型复合泵替代原来单一的离子泵^[6,10]。采用四极态选择器替代体积较大的六极态选择器也是改进的一个方面^[20]。

谐振腔是氢钟小型化的重要部分，新型的谐振腔虽然减小了体积减轻了重量，但是由于其本身很难满足起振条件，所以在伺服电路上也不同于主动型氢钟。根据电路原理的不同，将小型化的氢钟分成两类，一类叫反馈振荡型，一类叫被动型。反馈振荡型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。被动型氢原子频标的激光器工作在振荡阈值之下，其作用与谐振放大器相似。此时腔的有载品质因数 (Q_1) 可以远小于主动型激光器时的情况。

3 反馈振荡型氢钟

美国的休斯公司和俄罗斯无线电导航和时间研究所研制的小型氢原子钟使用了反馈振荡的方法。美国的休斯公司采用电极负载腔，电路是反馈振荡型。如图 2 所示是美国休斯公司研制的反馈振荡型氢原子钟的原理框图^[11]。它的伺服电路由三个部分组成：反馈回路、晶振伺服环路和腔的自动调谐。在传统的主动型氢原子钟中，谐振腔是一个相对独立的部分，而在反馈振荡型中反馈部分成为腔的重要组成部分。它将被放大的脉

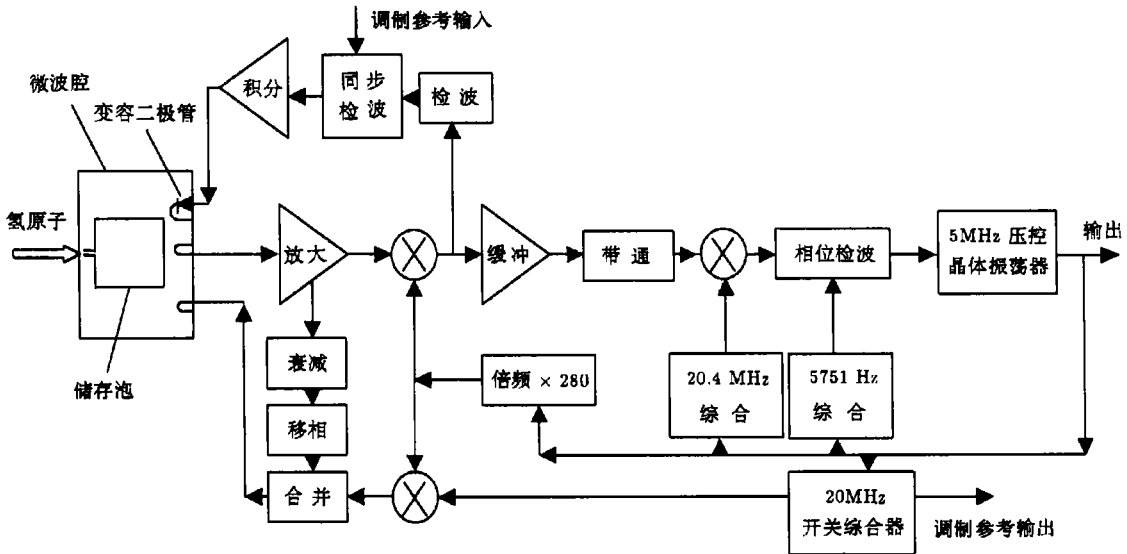


图 2 反馈振荡型氢钟的原理框图

泽信号的一部分反馈到腔，反馈回路的衰减率决定反馈量；移相器调节传播延迟使反馈信号与腔中的电磁场同相位。通过正反馈有效地减少了腔损耗或者说腔有载品质因数得到增益而维持脉泽振荡。为了降低腔对外界干扰的敏感度，需要注意反馈电路的稳定性。

假设腔的输入输出耦合系数是 β_1 、 β_2 ，且移相器可以完全抵消传输延迟，经过反馈增益的腔的外部品质因数可以表示为^[12]：

$$Q_e = Q_0 / (1 + \beta_1 + \beta_2 - 2G\sqrt{\beta_1\beta_2}) \quad (1)$$

其中 Q_0 是腔的无载品质因数， G 是反馈环路的增益。根据休斯公司研制反馈振荡型小氢钟的经验，当 Q_e 的值是 40000 时，电极负载腔的直径是 7.5cm，需要的增益是 8。

锁定晶体振荡器和腔的自动调谐电路与主动型氢钟的类似。在晶体振荡器的伺服电路中，通过相位锁定控制晶体振荡器。在腔的自动调谐中，利用方波跳频产生两个频率注入信号，输出的误差信号经过同步检波、积分去调整变容二极管的电压。反馈振荡型氢钟的频率稳定度可以表示为^[12]：

$$\sigma^2(\tau) = (KTQ_e/2Q_a^2P\tau Q_0)[(1 + \beta_1 + \beta_2) + ((N - 1)/4\beta_2)(1 + \beta_1 + \beta_2 - Q_0/Q_e)^2] \quad (2)$$

其中： K 是波尔兹曼常数， T 是腔和放大器的温度， P 是原子振荡功率， τ 为测量时间， Q_e 、 Q_0 、 β_1 、 β_2 含义同式(1)， N 是第一级放大器的噪声系数， Q_a 是原子的线 Q 值。从上式可以看到为了提高氢钟的频率稳定度可以从提高原子的线 Q 值和降低放大器噪声来考虑。

休斯公司曾经研制了几种型号的反馈振荡型氢原子钟，其中包括空间应用的小型氢原子钟。他们研制的实用型 CHYMN-IIIb 型小氢钟总重量 19.5kg，体积是 178cm×305cm×432cm，400s 的频率稳定度达到 4.1×10^{-14} 。

在反馈振荡型小氢钟中，虽然晶体振荡器的伺服环路和主动型的氢钟类似，但是它的稳定度已经受到了影响。通过在基本电路相同的情况下不同尺寸谐振腔的试验中发现如果氢钟的体积减小为原来的 1/3，它的短期稳定度会降低 30%^[12]。

Sigma Tau 公司也积极地从事了反馈振荡型氢原子频标的研究^[13]。他们对外部的电子系统进行了改进。为降低腔对外部扰动的敏感度，反馈系统置于腔的温控范围内，通过改变晶体管的偏置电压来调节回路的相位和增益。这种方法降低了部件的数目，消除了腔耦合传输线，但不能分别调节增益和相位参数。它的效果还有待进一步研究试验。

俄罗斯无线电导航和时间研究所也在致力于小氢钟的研究^[6]，他们研制小氢钟的目的就是用来替代 GLONASS 系统中的 Cs 钟。1988 年他们研制了第一台空间用蓝宝石腔小氢钟，经过一年的测试，在温度为 $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 时频率稳定度近似为 1.5×10^{-14} (时间间隔 $10^3 \sim 10^5\text{s}$)。除了它的体积 (75L) 和重量 (65kg) 以外，它已经满足了 GLONASS 的需要。考虑到发展水平、价格、体积、重现性、可靠性和电路实现的简单程度，俄罗斯无线电导航和时间研究所重点考虑研制磁控管反馈振荡型小氢钟。他们使用圆柱形磁控管腔，体积为 0.3L，腔的 Q 值是 3500。这样的腔体结构有着高的机械强度，抗气压变化和振动。在电路上它也有两个环路，电路原理与美国休斯公司的相同。谐振腔经过正反馈产生频率 1.4204057518GHz，强度不小于 100dB 的信号。他们生产的小氢钟体

积是 $500\text{mm} \times 365\text{mm} \times 365\text{mm}$, 重 40kg 。1994 年他们生产了两台小氢钟, 经过测试短稳 $\sigma_y(\tau) = 1.5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2} (\tau = 10^4\text{s})$, $\sigma_y(\tau) = (1.5 \sim 2) \times 10^{-14} (\tau = 24\text{h})$ 。经过地面测试, 小氢钟满足所有 GLONASS 的需要。从 1995 年开始他们在不增加体积和重量的情况下, 通过改变储存泡的体积, 提高温度的稳定性等方法设法提高产品的性能。

4 被动型氢钟

氢钟小型化的另一种方法是将谐振腔作为一个窄带放大器, 此时误差信号的检测原理和被动型铯钟、铷钟类似。探测信号经过调制注入到腔中, 误差信息从输出信号的幅度和相位中得到。和被动型铯钟、铷钟相比, 氢钟需要两个环路, 一个用来锁定晶体振荡器, 一个用来锁定腔频; 此外还要考虑到两者之间的相互影响。所以被动型小氢钟的电路要比被动型铯钟、铷钟复杂。和主动型氢钟相比被动型小氢钟的优势在于谐振腔无需满足起振条件, 腔的有载品质因数可以降低, 这样减小了腔牵引效应, 但使得腔的灵敏度较差。

美国的 NIST (National Institute of Standards and Technology) 研制了一种采用介质负载腔的小型被动型氢钟^[15]。它的无载品质因数在 $5500 \sim 6700$ 之间, 整个氢原子钟的体积是 $26.7\text{cm} \times 66\text{cm} \times 45.5\text{cm}$, 重 30kg 。图 3 是它的原理框图。

在被动型氢钟中, 用两个频率 $F1$ 和 $F2$ 对本地探测信号进行相位调制, 得到的误差信号分别用来校正腔频和探测信号源。其中 $F1$ 相当于微波腔的半带宽, $F2$ 相当于原子共振的半带宽。经过同步检波器的幅度检测和误差信号处理, $F1$ 同步检波器的输出被用来以 10s 的时间常数校正腔的频率; 同时这个信号还被用来以 1h 的时间常数校正炉温。 $F2$ 同步检波器的输出用来以 $1 \sim 2\text{s}$ 的时间常数校正探测信号的频率。实验表明它可以用作守时, 当 $1\text{s} < \tau < 5 \times 10^5\text{s}$ 时, $\sigma_y^2(\tau) = (1.5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2})^2 + (5 \times 10^{-15})^2$ 。每天的守时精度约为 0.4ns , 每周的守时精度达到 4ns , 频率漂移率为 $\text{几} \times 10^{-16}/\text{d}$ 。

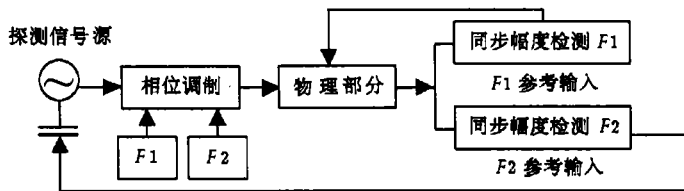


图 3 NIST 被动型氢原子频标的原理框图

俄罗斯的 KVARZ 公司长期从事被动型小氢钟的研究, 他们研制的 CH1-76 型被动型小氢钟成功地将高的频标稳定性和体积小型化结合起来^[16]。CH1-76 型被动型小氢钟每天的频率稳定度好于 10^{-14} , 这样的指标仅仅略差于主动型氢钟。它也采用磁控管型腔, 谐振腔的重量是 19.5kg , 直径 224mm , 高 520mm 。KVARZ 公司的小氢钟的电路与美国的 NIST 有所差别。它只有一个调制频率, 利用原子的吸收和色散原理区分出误差信号, 分别用来锁定腔频和晶振。用于锁定腔频的误差信号取决于探测信号的载波 f 及其

边带 $f \pm f_m$ (f_m 是调制频率), 使晶振锁定于氢共振线中心频率的误差信号由氢原子共振色散线给出。这样消除了调制信号之间的互调干扰, 但是增加了检测电路的复杂性。如图 4 所示是 CH1-76 型小氢钟的原理框图。晶体振荡器的 5MHz 输出信号经过 12.5kHz 相位调制, 倍频、综合后送入谐振腔。误差信号含在输出信号的幅度调制上, 通过 90° 移相器把两路信号分开, 分别进行检测、积分。经过指标测试, 大部分 CH1-76 型被动型小氢钟 1s 的稳定度为 $\sigma_y(\tau) = (5 \sim 9) \times 10^{-13}$; 当 $1s < \tau < 10^4s$, $\sigma(2, \tau) = (5 \sim 9) \times 10^{-13} \tau^{-0.5}$; $\sigma(2, \tau) = (4 \sim 7) \times 10^{-15}/1d$; 频率漂移小于 $1 \times 10^{-15}/1d$ 。

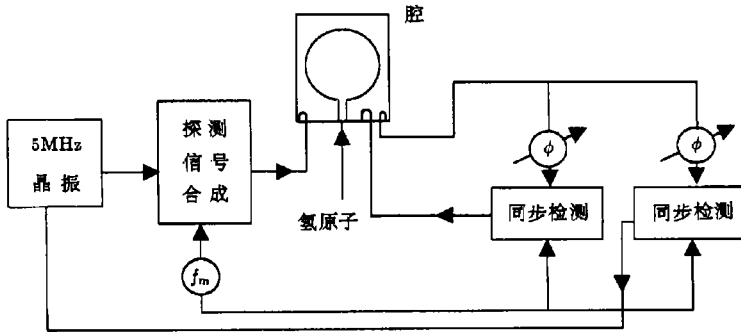


图 4 被动型氢钟原理框图

我国武汉物理所在 20 世纪 80 年代初试验被动型氢钟^[17]。在试验中振荡部分为原来主动型氢钟所用的结构, 只在腔下盖板上多安装了一个耦合环。在电路设计上武汉物理所和俄罗斯的 KVARZ 公司一样, 只采用一个调制频率 f_m 。未加恒温控制, 测量秒和 10 秒级取样时间的频率稳定度, 分别为 $7.1 \times 10^{-12}/1.1s$ 和 $2.2 \times 10^{-12}/11s$; 并且稳定度随 $\tau^{-1/2}$ 变化。

上海天文台氢钟的研究始于 1970 年。1972 年研制成功国内第一台主动型氢钟。此后经不断改进提高, 1987 年研制成实用型氢原子钟, 已先后小批量生产了 20 多台。20 世纪 80 年代末期开始小型氢原子钟的研究。探索了不同的小型谐振腔模式, 如电容负载腔^[14]和 TE111 谐振腔^[9]。采用了一种称为“回路切缝”的谐振腔设计理论来设计和制作电极负载腔, 使用外径 10cm, 长 10cm, 支架高 1cm 的储存泡, 4 块 0.3mm 厚的电极用树脂胶等间距地粘在储存泡的外面。谐振腔的有载品质因数为 3000 左右, 不到主动型谐振腔有载品质因数的十分之一; 电路部分设计成反馈振荡型进行试验。经过测试, 其稳定度与小氢钟相当, 并且在实验中发现反馈振荡型小氢钟的稳定度性能对实验室环境条件的依赖较大, 必须采取相应的恒温措施。90 年代开始研制被动型小氢钟, 采用两个频率进行调制, 已经通过了初步测试, 目前正在进行参数的优化和稳定性的提高。

5 小 结

运输方便、高性能的小氢钟是氢原子频标的发展方向之一。小氢钟的研究主要在美国和俄罗斯的研究所开展。在主动型氢钟的基础上研制小型氢钟, 被动型小氢钟的电路显

然比反馈振荡型复杂。但是反馈振荡型的氢钟需处理好反馈回路对系统稳定性的影响。在腔频稳定的前提下, 理论分析认为被动型氢钟的短期稳定度不如反馈振荡型, 但是它的长期稳定性好, 适合用于守时^[18]。

新型材料和新型电子器件的发展也可以进一步提高小氢钟的稳定度指标。例如利用新型的高温超导材料可以制作出高品质因数的电极负载腔。随着对外界环境的敏感性降低和低噪声电子元器件的发展, 小氢钟的稳定性指标将会有所提高。也有的实验室在做冷冻脉泽的实验, 即让激光器工作在冷冻条件下(认为工作温度 1°K 最佳)。在冷冻状态下, 腔材料的热膨胀极低, 腔也可以做得较小。随着微处理器和数字电路的发展, 使用数字技术进行信号处理或者模拟电路、数字电路的混合使用成为 20 世纪 90 年代原子频标电子线路的研究热点。目前在小铯钟上已经使用了新的电路设计^[19], 这为小氢钟的性能提高提供了新的思路。

参 考 文 献

- 1 Zhai Z C, Huang H X, He J W et al. In: Proceedings of the 6th European Frequency and Time Forum, European Frequency and Time Forum, Noordwijk, NL, 1992, s.l.: s.n., 1992:40
- 2 Allan D W, Hellwig H. In: IEEE PLANS 1978, IEEE Position location and Navigation symposium, San Diego, CA, 1978, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1978: 29
- 3 王义酋, 王庆吉, 傅济时等. 量子频标原理. 北京: 科学出版社, 1986: 340
- 4 Peters H E. In: Proceedings of 35th Annual Frequency Control Symposium. Pennsylvania, 1981, Washington, DC: Electronic Industries Association, 1981: 662
- 5 Peter H E. In: Proceedings of the 36th Annual Frequency Control Symposium, Philadelphia, Pa., 1982, Washington, DC: Electronic Industries Association, 1982: 240
- 6 Gouzha Yu G, Gevorkyan A G, Myasnikov A L et al. In: Proceedings of the 1995 IEEE International Frequency Control Symposium, San Francisco, CA, 1995, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995: 140
- 7 Walls F L. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1986. IM-30(2): 596
- 8 Mattison E M, Levine M W, Vessot R F C. In: Proceedings of the 8th Annual Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting. Washington, DC, 1976 : 355
- 9 王庆华. 博士论文, 上海: 中国科学院上海天文台, 1999: 42
- 10 Wang H T M. In: Proceedings of the 36th Annual Frequency Control Symposium, Philadelphia, Pa., 1982, Washington: Electronic Industries Association, 1982: 249
- 11 Wang H T M. Proc. IEEE., 1989, 77(7): 982
- 12 Lesage P, Audoin C. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1983, IM-30: 182
- 13 Peters H E, In: Proceedings of the 38th Annual Frequency Control Symposium, Pennsylvania., 1984, Washington, DC: Electronic Industries Association, 1984: 240
- 14 翟造成, 林传富, 何建卫等. 计量学报, 1994. 15(4): 276
- 15 Walls F L. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1986, IM-30(2) : 596
- 16 Demidov N A, Logachev V A, Uljanov A A. Characteristics and Performances of Active and Passive Hydrogen Masers and Time and Frequency Measuring Equipment. private communication, IEM "Kvarz", Russia, 1993
- 17 徐庆江, 李永龄, 来长文等. 武汉物理所集刊, 1983(2): 17
- 18 Audion C, Viennet J, Lesage P. Journal de Physique, 1981, 42: c8-159
- 19 Cutler L S, Giffard R P. In: Proceedings of the 1992 IEEE Frequency Control Symposium, Pennsylvania, 1992, New York: IEEE, 1992: 127
- 20 王庆华. 博士论文, 上海: 中国科学院上海天文台, 1999: 58

Subcompact Hydrogen Clocks

Liu Tiexin¹ Gao Junfa² Zhai Zaocheng¹

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(2. *Shannxi Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Lintong 710600*)

Abstract

Subcompact hydrogen clocks are developed in different institutes in the world. Different compact microwave cavities are used in order to reduce the size and weight, comparing to which of conventional hydrogen clocks. Electrode-loaded resonant cavity, magnetronic cavity, dielectric-loaded cavity and TE₁₁₁-mode cavity are often used in the subcompact hydrogen clocks at present, which will lead to failure of resonant condition. Two approaches in compact hydrogen clock design are presented. One design, the Q-enhanced maser oscillator, employs a hydrogen resonance to sustain oscillation in a microwave cavity which quality factor is enhanced electronically. The other design, the passive maser, uses the atomic resonance as a narrow bandpass amplifier.

Key words hydrogen maser: subcompact—microwave cavity—Q-enhanced maser oscillator—passive maser