

研究简讯

上海天文台氢原子钟稳定度已达到 10^{-15}

上海天文台使用中的氢原子钟,近年来特别是1985年以来,进行了某些根本性的改进。最近的性能测试表明,改进后的氢钟稳定度性能有了明显的改善,对于超过100秒取样时间的稳定度均已达到 10^{-15} 量级,进入国际先进水平。具体情况如下:

一、主要改进措施

1. 设计并建造了近实体型腔-泡结构。有许多因素影响氢脉泽的频率稳定度性能,其中最主要的不稳定性源是来自腔频率牵引效应。腔频漂移多由温度、腔的机械性能以及大气压变化引起。在我们最近的改进中,花了很大的精力来建造内在稳定的腔-泡结构。采用皮氏弹簧、滚轴支撑和漂浮假基板结构来消除热的、机械的和大气压变化所致的腔-泡结构的应力变化。实际上是一个近乎实体型的腔-泡结构,如图1所示。这种结构的关键点在于皮氏弹簧的校准以及不需机械调谐的腔-泡共振匹配。而完成这些关键措施又是以抛光腔接到光学平面为基础的。可以预期,它是消除氢脉泽频率长期漂移的有效措施。

另外,我们为这种实体型腔-泡结构设计并建造了新颖的极薄的原子储存泡,重量仅160克。大大消除了由于石英介电常数随温度变化所致的腔频不稳定性。实测表明,腔-泡整体频率温度系数仅 $100\text{Hz}/^\circ\text{C}$ (从室温 20°C 到腔炉平衡温度 42°C ,腔频仅变化 2.2kHz)。在国内外氢脉泽研究报导中尚未见到过这样低的频率-温度系数。

2. 设计并建造了调谐与二极管功能合一的脉泽腔调谐系统,如图2所示。将变容二极管直接放入腔内构成调谐耦合回路的一部分(消除了以前在腔外拖一变容管架的不合理结构),并且使调谐回路与腔隔离接触,且做到由耦合环看出去的阻抗保持不变,这一点是十分重要的。

3. 我们所进行的另一个重要改进是锁相电子学系统的完全更新,我们想法消除了原来系统中压控

不应存在的附加噪声,从而大大降低了整个锁相环路的噪声电平。在实践中得知,仅仅注意量子振荡器的改进而忽视锁相电子学应该采取的措施,要得到 10^{-15} 的稳定度也是不容易的。

4. 在改进中,尚有一点也是后来才引起我们重视的,那就是电离源的辐射问题。我们研制了新型电感式电离源结构,如图3所示,不仅提高了电离效率,并且采取了电屏蔽措施,有效地消除了电离源高频辐射对脉泽接收机系统及束流量控制器的干扰,收到了明显的效果。

5. 脉泽腔输出到接收机输入之间,我们接入了一个隔离度为 90dB 和一个噪声系数为 4dB 的前置放大器(都是国外元件),并恒温起来(控制到百分之几度),对于隔离腔体外负载的影响以及降低接收系统总噪声系数都有着重要的作用。

当然,必要的实验室条件,如室温控制在 $20\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以及好于 $0.1\%^\circ\text{C}$ 的腔体温度控制器的使用都是不可缺少的。

6. 一个高精度的频率比对设备是不可缺少的。我们采用国外元件及线路研制了一套从 405kHz 到 2GHz 之间任何频率上都可直接对标的频率比对设备。实测表明,它的自校精度为 $1.21\times 10^{-14}/1\text{s}$, $2.73\times 10^{-15}/10\text{s}$ 和 $4.86\times 10^{-16}/100\text{s}$ 。这套频率比对设备能够充分反应出氢脉泽的频率稳定度。

二、测量

在我们的实验室,氢脉泽频率稳定度数据的采集与计算全部采用微机化,给出实时的稳定度性能显示和打印结果。

两个被氢脉泽相位锁定的石英晶体振荡器(瑞士OSA晶振)的 100MHz 输出,分别送到频率比对设备,它的输出经IEEE-488配接器送到计算机系统,进行实时计算,显示并打印,如图4所示。图4(a)为测试方块图,4(b)为微机测试系统,可以看出,微机屏幕上显示出实时稳定度指标。取样时

1987年4月21日收到。

间 1 秒到 10 秒的选择由直接调节综合仪实现, 100 秒以上由计数器倍乘来实现。

特别重要的一点是, 在脉泽热平衡以后, 在稳定度测试之前, 必须进行脉泽腔的调谐。在我们的实验室中, 氢脉泽的调谐也是采用微机化的, 正如上面提到的, 我们的新变容二极管调谐回路结构, 测试起来特别方便。在微机的程序控制下, 它会直接在屏幕上显示出氢脉泽的调谐点, 并打印下来。如图 5 所示, 调谐点的精度很高 (注意, 没有足够的精度, 便反映不出 10^{-15} 的频率变化), 而且调谐的可靠性由相关系数 γ 表示。这比手工调谐及制图求调谐点方便、精确和可靠得多。

三、结果与分析

图 6 表示上海天文台氢原子钟最近的稳定度性能。

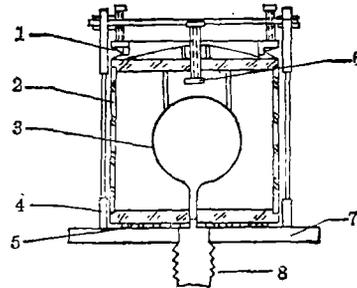
我们的氢脉泽的稳定度性能与现工作条件下的理论预期基本相符。

当然, 长期稳定度性能将不适用这种统计规律,

它将由实验室条件以及氢脉泽的系统效应决定。对于更长时间的稳定度目前正在测试中。

对改进后的氢钟使用的结果使我们确信, 我们正在研制的新钟的机械、电子学、热控制以及磁控制均较老钟有明显的改进, 因此, 可以预期新钟将有更好的指标, 预期的性能也于图 6 中表明。

中国科学院上海天文台氢原子钟组



1. 蝶形弹簧; 2. 谐振腔; 3. 储存泡; 4. 玻璃杆; 5. 滚珠; 6. 小活塞; 7. 腔盖板; 8. 波纹管。

图 1. 腔-泡结构。

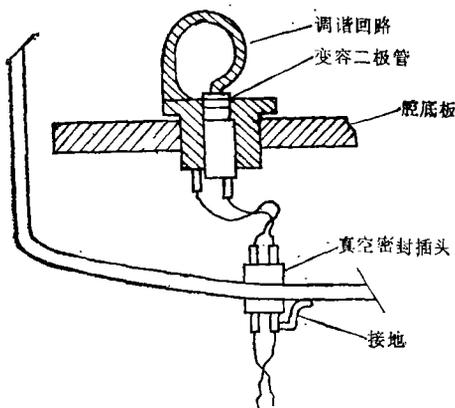


图 2. 脉泽腔调谐结构。

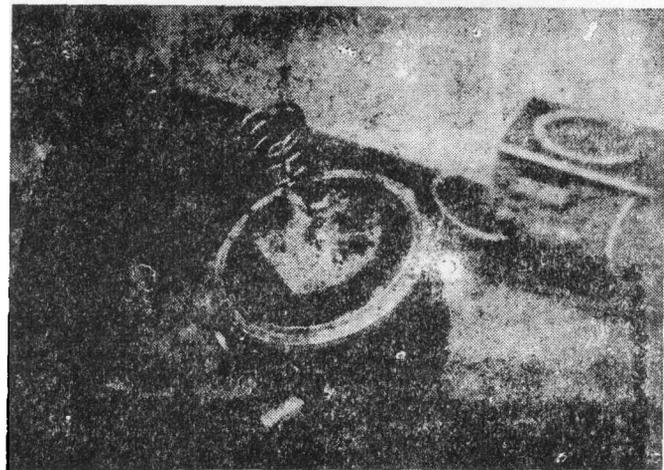


图 3. 电离源结构。

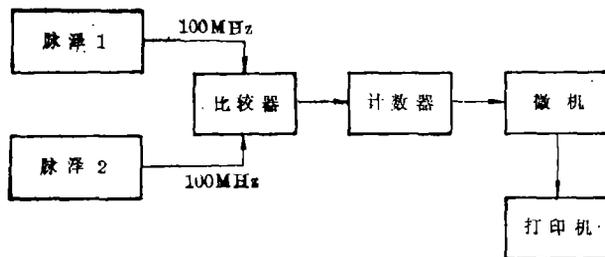


图 4. (a) 测量方块图。



图4. (b) 微机系统。

FLUX TUNING AND LINE Q MEASUREMENTS

=====

DATA: 1987.04.21

TEST BEGINS TIME: 15:25:00

No.	Diode Volt	Average Period	
1	1.5	9.485179	
2	2	9.58225906	
3	2.5	9.6769708	
4	3	9.77008054	
5	1.5	9.48024528	T(high-low)=-4.93371487E-03
6	2	9.58296584	T(high-low)=7.06776977E-04
7	2.5	9.68381661	T(high-low)=6.84581697E-03
8	3	9.78339276	T(high-low)=.0133122206

Tuning Point V = 1.92288262 Volt
 Relative Coefficient r = .970494959
 Line Q1 (Low Flux) = 1.34811384E+09
 I.F. Level (Low Flux) = 90
 Line Q1 (High Flux) = 1.27034345E+09
 I.F. Level (High Level) = 103

图5. 微机调谐。

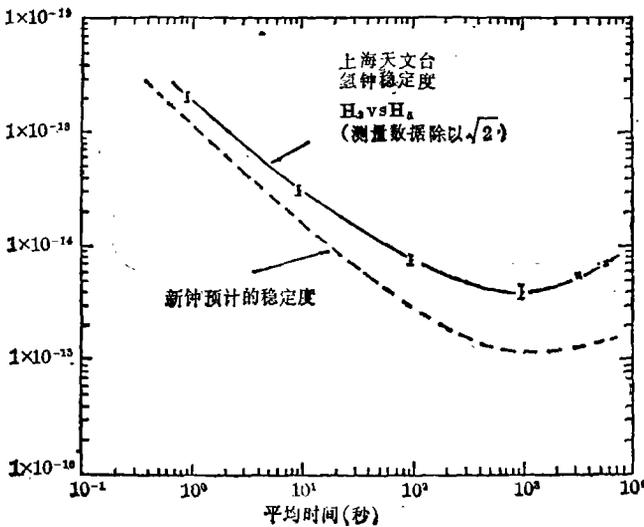


图6. 上海天文台脉泽稳定度数据和预计的新性能。

Hydrogen Maser's (SO)
Stability Has Been Reached 10^{-15}
 (Hydrogen Maser Group, Shanghai
 Observatory, Academia, sinica)