

## 史密松天体物理台氢脉泽频率稳定度的最新进展

### 提 要

好的频率稳定度和高的工作可靠性，是一个频率标准关系到它的用户的主要特性。这篇材料描述在史密松天体物理台为提高 VLG 氢脉泽频率稳定度和工作可靠性所采用的技术的某些主要方面。

#### 一、引言

一个频率标准的用户不仅要求这个标准具有好的稳定度性能，而且要求这个标准具有高度的工作可靠性。

史密松天体物理台 (SAO) 研制的 VLG 氢脉泽已经是可运输的商品化的氢脉泽。而且 SAO 为重力红移实验研制了第一个空间飞行氢脉泽，这个脉泽在 1976 年被成功地发射<sup>[1]</sup>。SAO VLG 氢脉泽，是能够很容易地运输到世界各地的仅有的氢脉泽。图 1 表示拆去面板的完整的氢脉泽标准。

VLG 氢脉泽是第一个实现稳定度具有  $\tau^{-1/2}$  稳定度性能的氢脉泽，并且它们达到了热动力学所预期的理论限度<sup>[2]</sup>。图 2 表示 VLG 氢脉泽的频率稳定度。

#### 二、得到频率稳定度和工作可靠性的途径

肯定有很多因素影响一个氢脉泽的频率稳定度性能。在氢脉泽中存在有两个基本不稳定性源。那就是它的频率稳定度受到其频率分量位于原子跃迁线宽内的热噪声  $kT$  的限制，以及受到它的接受系统热噪声的限制。这两个噪声过程可以作为不相关的过程被合并起来，由 Vessot-Cutler-Searle 表示式给出：

$$\frac{\Delta f}{f} = \left\{ \frac{kT}{2} \left[ \frac{FB}{2\pi^2 f_0^2 p_0 \tau^2} + \frac{1}{Q_i^2 p_0 \tau} \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

肯定没人能够完全消除所有不稳定性效应。在 SAO，得到频率稳定度的途径是把脉泽做得尽可能内在稳定，然后如果适当的话，使脉泽在补偿任何其它剩余干扰的条件下工作<sup>[3]</sup>。

目前，氢脉泽中存在的主要不稳定性是由腔频率牵引引起的。腔频率漂移的最可能的原因是腔尺

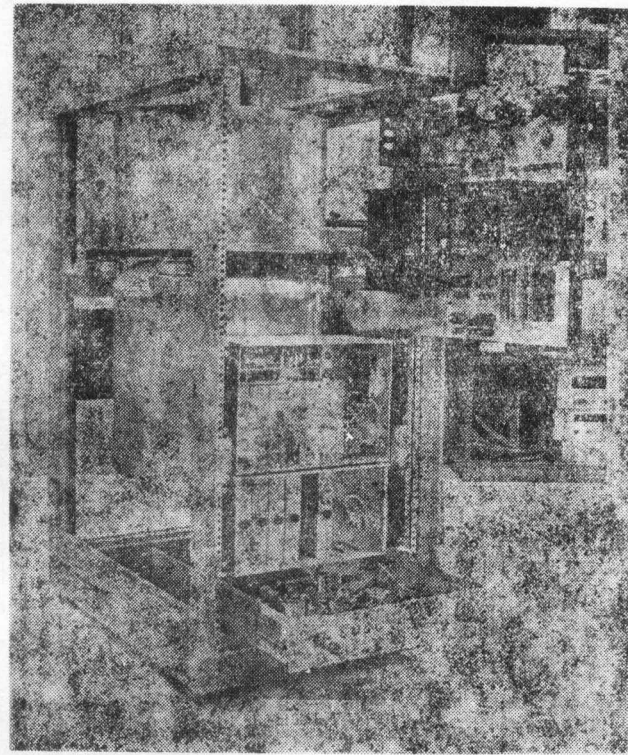


图 1

寸的变化，而这种尺寸变化多半是由于室温的变化、大气压的变化或腔的机械性能的变化引起的。在 SAO，采取了很大的注意力来建造机械稳定的、低热膨胀材料的腔共振器，并且保证接头的机械稳定性。隔离由于气压变化所引起的腔机械应力的变化，并且保证对脉泽接收机的射频连接很仔细地电隔离。SAO 氢脉泽实验室发现，CER-VIT 101 有  $-1.2 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$  最低的膨胀系数<sup>[4]</sup>。在 VLG 氢脉泽中以及在空间飞行脉泽中所使用的腔都是用

1983年12月8日收到。

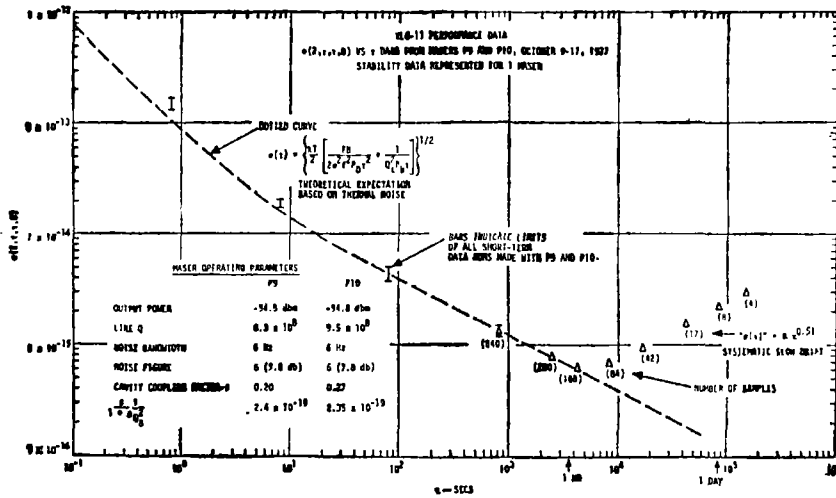


图 2

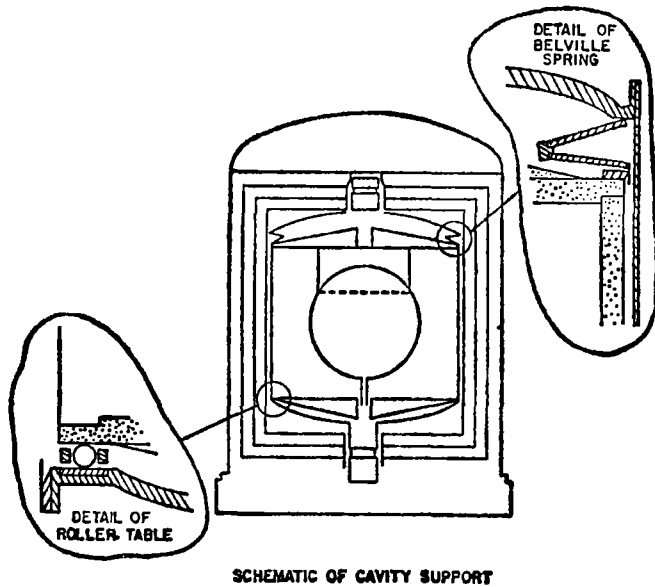


图 3

CER-VIT 101 材料做的。腔-泡结构设计成能使腔的频率不受热和机械应力变化的影响。腔的外面有一个牵制罩，它把腔固定在一起。由于这个牵制罩的热膨胀系数引起的可能的腔应力变化被皮青铜做的贝氏 (Belleville) 弹簧所吸收，对这个弹簧所施加的力，要保证使它工作在其力的形变特性曲线的

平坦部分。类似地，在基板上热传导的径向应力由六个硬化的皮青铜滚子吸收掉。这个牵制罩也用作一个热屏蔽罩，并且在腔和钟罩之间造成一个辐射热传递的障碍。由于大气压变化而引起的对真空钟罩的可能应力，用一个“漂浮基板”结构与腔隔离。图 3 表示腔-泡结构和它的应力消除机制<sup>[5]</sup>。

腔频率漂移也可能由腔内石英储存泡的介电常数的温度诱导变化引起。在 SAO，他们应用一个质量特别小的石英泡 (170 克) 没有采用任何补偿机构就把这个效应减小到大约  $\frac{1}{f} \frac{\Delta f}{\Delta T} = -300$  Hz/°C<sup>[6]</sup>。

在美国 JPL, NRL 和 SAO 的工作已经表明，某些 VL6 氢脉泽显示出每天  $10^{-15}$  量级的有规律的长期频率漂移<sup>[7]</sup>。在 SAO，腔材料以及腔圆柱与盖之间接触性能的研究表明，脉泽频率长期有规则的漂移效应，是由于圆柱间接头处腔的研磨表面处理情况引起的<sup>[7]</sup>。他们已采取以下步骤来减小这种漂移：抛光腔端板和腔圆柱端

面以及在清洁室条件下安装腔诸办法。初步的测量表明, 漂移效应很大地被减小。

当然, 脉泽频率的变化也能由它的结构的其它方面引起。为了增加磁屏蔽性能, 他们在最近的 VLG-11 氢脉泽上设计并安装了锥形端面磁屏蔽, 如图 4 所示。

一个多层印刷线路罗线圈(图 5)被安装在脉泽上, 用来产生弱的内部应用磁场并保证它的均匀性。这种设计能够完全消除杂乱磁场, 并且提供了一个很轻的、紧凑和简单的线圈系统。

肯定脉泽频率也受到它的电路设计的影响。应该仔细地设计和建造电子学部分。为了增加可靠性和短期稳定度, SAO 氢脉泽实验室重新设计了 VLG 脉泽接收机的某些部分, 并且重新建造了整个接收机。他们合并了 VLG-11B 接收机的成功的射频设计(如图 6 所示), 这部分设计是以 100MHz VCXO 为基础的, 并且采用了微带滤波器电路<sup>[9]</sup>。接收机的机箱是用一整块铝块加工出来的, 这提供了机械坚固性和热的均匀性。图 7 表示去掉盖的整个接收机。这种装配方法减少了射频电路中的同轴连接器的数目, 因而减少了噪声源<sup>[9]</sup>。而紧要的电子学部分, 如倍频器和分频器是温度控制的。在脉泽输出电路里, 跟随隔离器直接接入了一个低噪声的前置放大器, 这个放大器能把接收机的噪声系数减小到大约 5dB。必须特别注意以保证到接收机的射频连接是非常仔细的电隔离。

在腔-泡结构和脉泽信号接收系统设计较好的条件下, 为脉泽工作提供一个适当环境以补偿剩余干扰也是必要的。氢脉泽的热设计和它的封装是明显的特征。SAO 的氢脉泽研究者指出, 沿真空钟罩的热梯度是引起腔频率漂移的主要原因, 并且指出, 单独增加热增益和改善前置放大器的稳定度, 对解决这个问题是无效的<sup>[9]</sup>。把真空钟罩(和恒温炉)分成独立的探测和控制的区(顶部、圆柱体和底部), 并且各有自己的探测热敏电阻、放大器和加热绕组, 对于减小梯度问题已被证明是一个强有力的技术措施。另外, 在钛泵和腔底板之间的真

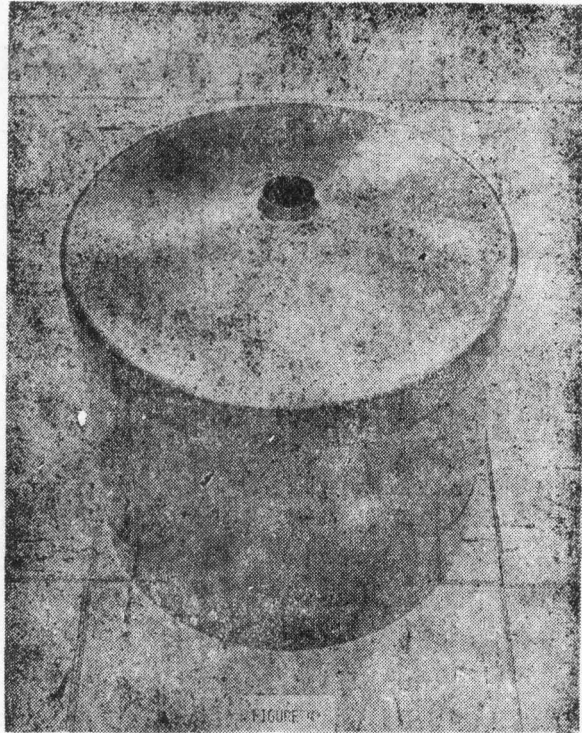


图 4

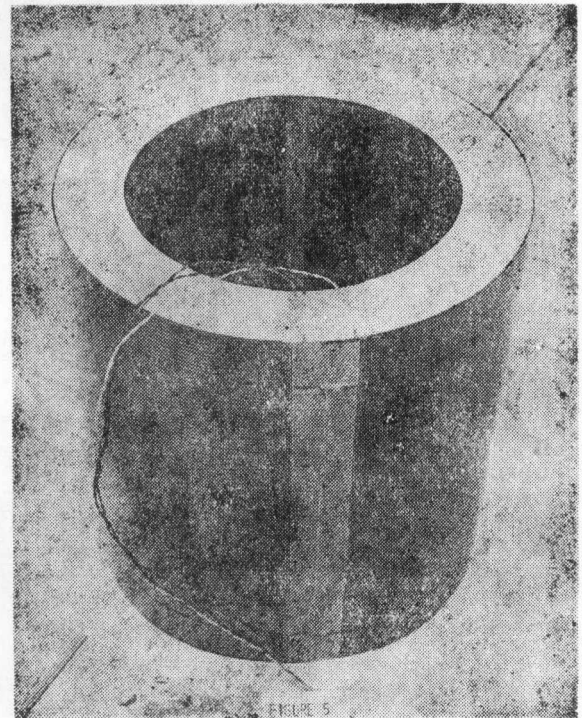


图 5

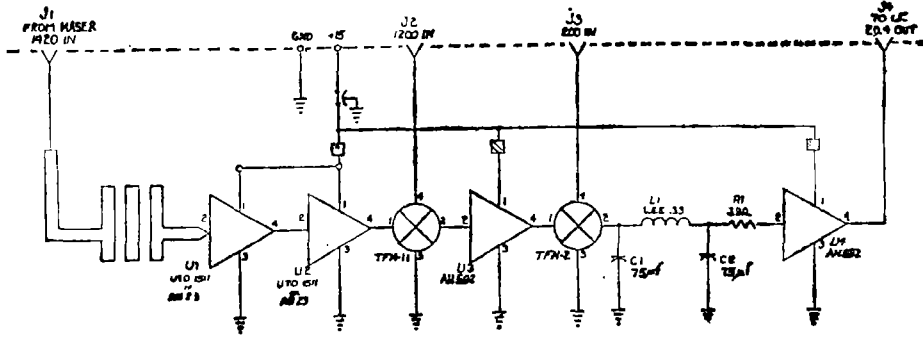


图 6

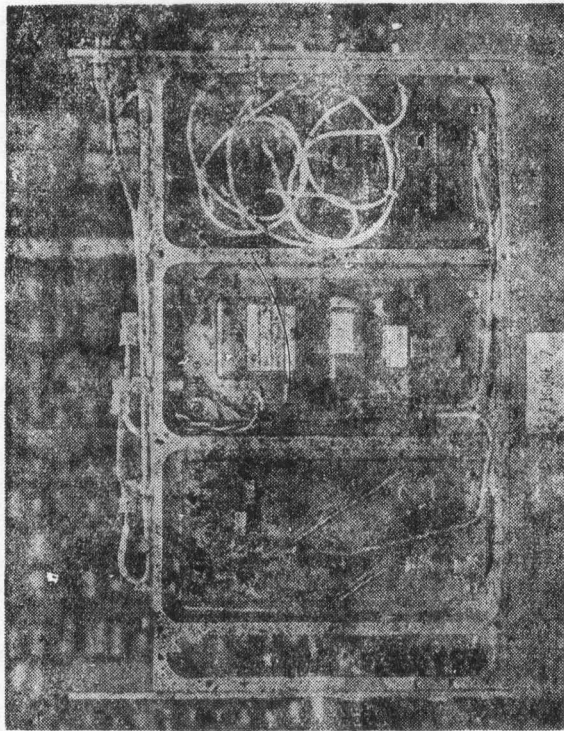


图 7

空脖颈是用钛金属管做成，其上安装了一个恒温器，并且有着自己独立的控制器，这种钛脖颈除具有高强度外，还使由腔到脉泽外面的热量漏失大大减少。

为了增加脉泽内部温度控制系统的效率，他们在脉泽机柜内装入了一个温度控制器——一个完全独立的系统，有着自己的敏感元件和电子学电路，这

实际上把脉泽机柜变成了一个恒温器。在 21—28℃ 的室温范围内，它产生一个近似  $8 \times 10^{-16} / \text{C}$  的温度灵敏度<sup>[1]</sup>。

SAO 的 VLG 氢脉泽不仅有着优良的稳定度性能，而且有着高度的可靠性和可搬运性。最近，在 USNO 对它的由 SAO 最近制造的两个氢脉泽的测量表明，VLG-11 氢脉泽的新产品实现了到目前为止最好的稳定度数据 ( $4.3 \times 10^{-16}$ /小时)。USNO 期望这两台新脉泽能够把美国时间系统的天到天的实时数据改善 10 倍。

尽管如此，许多为精炼 VLG 氢脉泽设计和提高频率稳定度的新思想，仍然在 SAO 氢脉泽实验室里产生出来。

### 三、结束语

经过 R. F. C. Vessot 领导的氢脉泽研究组二十多年的研究努力，SAO 的氢脉泽终于成为一个世界范围内为科学家所信赖的实际的研究工具。

### 四、感谢

感谢 Dr. R. F. C. Vessot 为我提供在 SAO 学习氢脉泽的机会。感谢他和他的同事 Dr. Edward Mattison 对这工作给予我的帮助。

### 参 考 文 献

[1] Vessot, R. F. C., Levine, M. W., Mattison, E. M., Hoffman, T. E., Imbier, E. A., Tetu, M., Nyström, G., Kelt, J. J., Trucks, Jr. H. F. and

- Vaniman, J. L., Space-born hydrogen maser design, *Proceeding of the 8th PTTI meeting*, (1976).
- [2] Vessot, R. F. C., Levine, M. W. and Mattison, E. M., Comparison of theoretical and observed hydrogen maser stability limitation due to thermal noise and the prospect for improvement by low-temperature operation, *Proceedings of 9th PTTI meeting*, (1977).
- [3] Mattison, E. M. and Vessot, R. F. C., Techniques used in SAO hydrogen masers for increased frequency stability and reliability, Japan, (1982).
- [4] Proposal to JPL for a program of modification and testing of SAO hydrogen masers, P960-3-80, SAO, (1980).
- [5] Levine, M. W., Vessot, R. F. C., Mattison, E. M., Blombery, E., Hoffman, T. E., Nystrom, G., Graveline, D. F., Nicoll, R. L., Dovidio, C. and Brymer, W., A hydrogen maser design for ground applications, *Proceedings of the 8th PTTI meeting*, (1976).
- [6] A report on the evaluation of the performance of the SAO VLG-11 atomic hydrogen masers, Final report, SAO, (1977).
- [7] Vessot, R. F. C., The atomic hydrogen maser — Is it the best clock for gravity and relativity measurements?, Third Marcel Grossman meeting on the recent developments of general relativity, Shanghai, China, (1982).
- [8] Operating and maintenance manual for the model VLG-11B atomic hydrogen maser, SAO, (1983).
- 翟造成<sup>\*1</sup>(中国科学院上海天文台)

## Recent Development of Frequency Stability of the SAO Hydrogen Masers

Zhai Zaocheng<sup>\*2</sup>

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

### Abstract

Good frequency stability and high reliability of operation are the major characteristics of a frequency standard that concerns its users. This material describes some aspects about the approaches taken by SAO to increase frequency stability and operational reliability of the SAO VLG hydrogen masers.

## 银河系是一个椭圆星系吗?

许多天文研究工作已在探测可观测宇宙极遥远的天区,但对于我们银河系结构的基本细节却仍未弄清楚。例如,对包含太阳在内的薄银盘的情形虽已知之甚多,但对于包围着银盘,由老星组成的黯淡“银球”的情况却知之甚少。最近,两个研究银球中恒星计数的天文小组对银球的质量得出矛盾的结论。但是无论如何,银球是银河系不应被忽视的组成部分,也许是重要的组成部分。

银球之所以被忽视是由于其固有的亮度很暗弱,它既没有象银盘中显示旋臂结构的新形成的亮

星,而且在太阳附近,银球成分的密度也远小于银盘恒星的密度,但把银球所占较大体积内的所有恒星加在一起,其总数可能与银盘内的恒星总数不相上下。

过去手动和目视测量天文底片的方法使我们遗漏了许多暗弱的恒星。G. Gilmore 和 N. Reid<sup>[1]</sup>用电子计算机控制扫描光束的底片测量仪,将不同固有亮度的恒星的相对数的测定提高到一个新水平,测出比老方法暗弱 100 倍的恒星。他们用这一方法对南银极方向的不同亮度和颜色的恒星进行了

<sup>\*1</sup> 现在美国史密松天体物理台进修。

<sup>\*2</sup> The author is with the Center for Astrophysics, Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, Mass., USA.