

双真空主动型氢脉泽的设计

王文明^{1,2}, 代克^{1,2}

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 氢脉泽是现代一种高精度的时间和频率标准, 其在基础理论、导航和通信等领域具有重要作用。随着空间科学技术的发展, 小型、易搬运、高性能氢原子钟的研制势在必行。介绍了一种主动型双真空氢原子钟的小型化设计, 并将其与传统型氢原子钟设计进行了比较。

关键词: 主动型氢脉泽; 小型化; 双真空

中图分类号: TM935.115

1 前言

时间是国际单位制中 7 个最基本的物理量之一, 并且其测量精度最高。近几年来, 随着我国 SLR、VLBI 等高新技术的发展, 精密稳定的时频标准越来越显示出它的应用前景。目前, 上海天文台生产的主动型氢原子钟已实现商品化, 其结构坚固、性能稳定, 经得起海、陆、空运输考验, 被广泛应用于我国科研、国防等相关领域^[1]。

在氢钟的研制和实际应用中, 我们不断改进限制氢原子钟性能提高的各种因素, 使氢钟更加完善。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, 但由于其物理部分重量重、体积大 (以上海天文台生产的 SOHM-4 型氢原子钟为例, 其总重量达到 250 kg, 总体积有 540 mm × 740 mm × 1110 mm), 较难搬运, 这就限制了它在一些重要领域的应用; 其单真空的设计也经常会出现漏气、泵打火现象; 暴露于大气的腔外结构也不太利于保持腔体温度的稳定, 这些设计也会带来一些生产加工的不便。为了进一步稳定甚至提高仪器性能指标、简化仪器结构、实现小型化设计, 为开发下一代空间钟做好准备, 上海天文台时频中心提出了开展主动型氢原子钟小型化设计的研究计划。此设计是主动型氢原子钟小型化的预研究, 它将在保持氢原子钟可靠性与性能的基础上大大减小其重量与体积, 进一步拓展氢原子钟应用领域, 为我国国防与大科学工程提供小型化高精度原子频率标准。

2 主动型氢原子钟的工作原理

氢脉泽有很高的中期及长期频率稳定度, 这归结于以下因素:

第一, 原子与高频电磁场长时间的相互作用是主要决定因素。为了增加相互作用时间, 在氢脉泽上使用了一个特别的储存泡。它用惰性材料 (如聚四氟乙烯) 被覆, 来减小在碰撞期间的原子状态扰动。存储时间接近 1 s, 因而氢跃迁线品质因数非常高 $Q_a = Q_c v_0 / \Delta v_0 \approx 2 \times 10^9$ (Q_c 为腔品质因数)^[2]。

第二, 氢原子具有小体积和低极化性。这对减小原子与储存泡墙壁相互作用和对原子共

振频率的影响非常重要。可以比较, 在储存泡相似的前提下, 铯原子共振频率偏移 150 Hz, 比氢原子在相同条件下高 3 个量级。

第三, 考虑一阶多普勒频移的作用, 但因为在有限的空间中, 所以此作用微不足道。

总的来说, 氢脉泽有很高的中期及长期频率稳定度关键在于其腔-泡结构的设计, 因此在新的设计中仍将保留这一优势设计, 但在真空度上较以前有所改变。

应该注意到, 氢能级结构很简单。首先量子系统被认定为二能级系统, 但实际上相邻能级的出现是额外的频率偏移的原因。氢脉泽从 $F = 1, m_F = 0$ 到 $F = 0, m_F = 0$ 的跃迁 (σ 跃迁) 在氢原子基态超精细分裂结构之间发生。上述结构是电子和原子核自旋相互作用的结果。在一个恒定的磁场下, 由于 Zeeman 作用电子基态被分裂成四个超精细能级, 如图 1 所示^[3]。

氢原子钟的工作原理, 从其物理部分可以清晰体现出来, 传统氢原子钟物理结构如图 2 所示。在物理部分之外放置着一个氢瓶, 它一般固定在机架上, 长期提供氢脉泽正常工作所需要的氢。氢原子钟工作时, 分子氢从氢瓶中流出, 经过密封管道进入提纯器。提纯器的工作原理基于氢比其他气体对金属的渗透性更好, 更易通过金属薄壁, 通过改变金属的温度即可改变氢透入的流量。通常使用钯或镍作为提纯器的材料。氢分子通过提纯器进入电离泡后被电离。电离由高频源激励发生。HF (High Frequency) 频率为 70~140 MHz, 功率为 5~10 W。氢分子被电离后由多孔或单孔准直器形成束流。通过态选择器

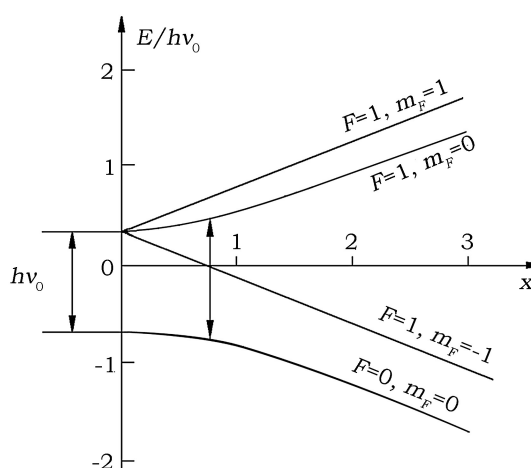


图 1 氢原子基态精细磁子能级分布

以后, 只有 $F = 1, m_F = 1$ 和 $F = 1, m_F = 0$ 能级的原子被留下。之后原子进入储存泡 (容量 2~4 L)。泡表面涂聚四氟乙烯, 它可以使原子与其发生弹性碰撞而不致引起原子态扰动。氢原子再结合成分子的可能性大约仅为 10^{-5} , 且有 1 s 存储时间。储存泡位于 TE011 模式的圆柱形微波腔的中心。用 TE011 方式可以在微波腔的轴心产生一致的微波磁场。典型的微波谐振腔的腔品质因数 Q_c 为 35 000~45 000^[4]。在腔外由螺线管产生一个轴向静态磁场。多层磁屏蔽系统由高磁性玻莫合金制成, 防止四周磁场变化对脉泽工作磁场产生扰动。在高真空条件下, 储存泡真空度为 10^{-6} Pa, 腔真空度为 10^{-4} Pa。而在传统设计中, 腔-泡拥有一样的真空度, 为达到真空的最优化设计, 在新的设计中必须予以考虑。储存泡里的氢原子在均匀弱磁场作用下, 发生 σ 跃迁放出光量子, 然后感应其他原子发生跃迁, 放出同样频率的光量子, 该过程是雪崩式的。当进入腔中的原子足够多时, 由于感应辐射而产生的电磁能量足够补偿腔的损耗时, 激光器发生自持振荡, 而无需外部激励。电磁能量由谐振腔的输出耦合环取出, 通过电子部分的控制系统把石英晶体振荡器的相位锁定到激光器 (脉泽) 相位上, 最后通过频率转换输出用户需要的频率信号。

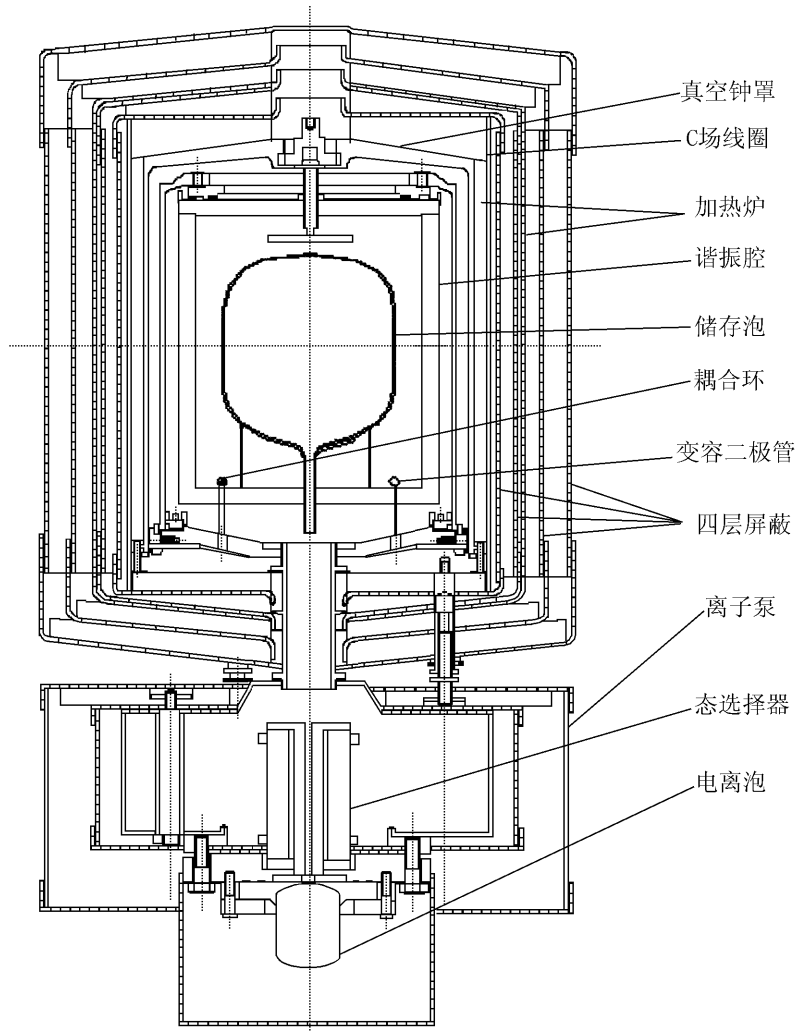


图2 传统主动型氢脉泽物理部分示意图

3 氢原子钟双真空结构设计

氢原子钟双真空结构由于保留了原先的腔-泡结构尺寸，因此其体积的减小主要从屏蔽层和保温系统方面的设计改进上体现出来。另外双真空的设计也带来了腔泵连接和导线布置的改变，腔泵相对位置的改变也势必带来束光学结构的改变。新的设计结果表明其体积和重量都有大幅减小，而且结构也将更加简约合理，预计在后续的实验指标测试中所得结果会比原设计更加理想。

3.1 真空系统的改进

现有产品如图2所示是一个单真空系统，具体地说就是只有腔泡结构处于高真空环境下，因为氢原子钟正常工作要求原子跃迁区必须在高真空条件和环境的高洁净度下。然而，腔并不需要像泡中那么高的真空度，况且空间越大，高真空度越难达到和维护。此外其他构件如加热炉、屏蔽层、C场线圈等由于完全暴露于标准大气压环境下，这对氢原子钟这种对温度稳定度要求苛刻的仪器来说很不利。因为暴露于大气环境下更不利于温度的稳定，更经

不起外界热冲击, 而温度波动又势必带来氢原子钟性能指标的下降。因此该设计中的高真空对腔来说有冗余而对腔外结构又有缺失。

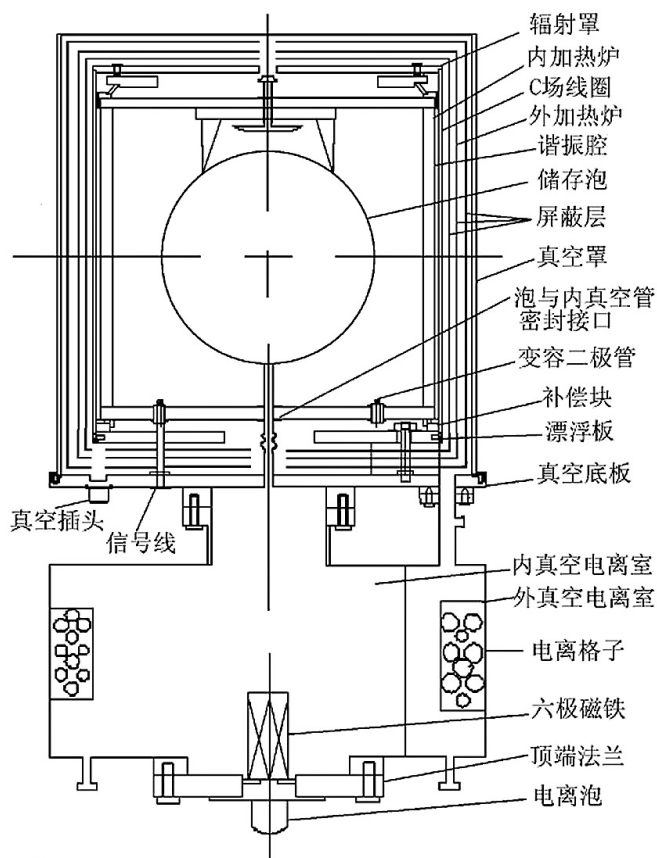


图 3 双真空主动型氢脉泽物理部分示意图

如果从氢原子钟内各部分对真空度要求不同的角度出发, 改进设计、取长补短, 在真空室外再加一层真空室, 即把泡作为一个单独的真空室, 腔、加热炉、屏蔽层、C 场线圈等在泡外构成另一个真空室, 实现一种双真空结构的设计。此理论分析完全可行, 而且会使氢原子钟内的工作环境更加优越, 这不仅会保持甚至能提高其性能指标。

两个真空室的设计首先是离子泵的改变, 设计中一层金属把泵的内部空间分开, 从原有的 8 个电离格子中拿出大半用于内真空室, 剩下的部分用于外真空室。

泵的两个室分好之后进行真空室的连接设计, 在氢原子钟内部直接用一根钛管道将泡和泵及电离泡相连, 注意钛管跟泡口接口要求严格密封, 余下的所有部分可以在外真空底板处开一个洞用钛管道连到另一个离子泵, 至此整个真空系统由单真空型改进为双真空型。

3.2 恒温炉的改进

双真空的设计, 使加热炉直接处于真空里面, 这使得氢原子钟内部恒温系统受益最大。因为在真空环境下能最大限度地减少与外界的热交换, 降低外界环境的热冲击, 保证温度稳定不发生波动, 同时可以大大降低恒温控制所需要的功耗。

在新的设计中, 去掉了屏蔽层间厚厚的保温层, 仅仅留下薄薄的加热丝筒, 从而减小了

屏蔽层间距, 缩小了体积和重量, 节约了材料。另外还可以将加热炉直接烙在辐射罩和屏蔽层上面, 进一步缩小屏蔽层间的间距, 这不仅节约材料, 更有利于简化生产装配步骤和实现热平稳。

3.3 屏蔽的改进

氢脉泽除了对内部工作环境温度要求苛刻外, 对外界磁场也很敏感。科学合理的磁屏蔽设计也是改进设计中较重要的一环。传统设计中由于有环境恒温的要求, 屏蔽层间需要加保温材料致使屏蔽筒直径居高不下, 这也影响了氢原子钟的体积和重量。

如图 4, 在新的设计构想中, 由于去掉了厚厚的保温层, 并且不再单独留有加热炉筒, 大大缩小了屏蔽层直径, 从而可以节约大量昂贵的玻莫合金和钛, 并且减小氢脉泽体积、降低其重量。更有利的是, 从屏蔽效果角度看, 内屏蔽筒越接近腔泡, 屏蔽效果越好, 因此新的磁屏蔽设计使氢原子钟内的工作环境受外界磁场影响更小。通过严格的理论数值计算, 得出屏蔽层间的最佳距离, 计算出每层屏蔽的尺寸, 设计出零件图 (由于篇幅有限, 具体理论推导过程见《新型氢脉泽磁屏蔽的设计》一文)。

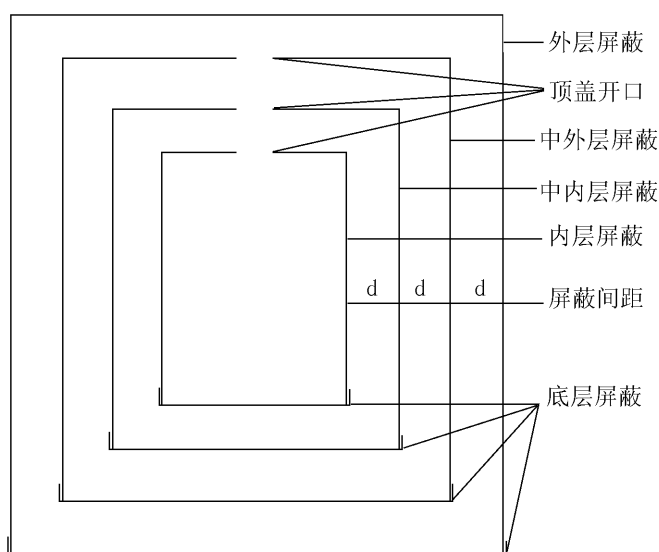


图 4 氢脉泽磁屏蔽示意图

3.4 真空环境的维护

因为除原子储存泡外的所有部件都放在了外真空室中, 所以要解决好真空环境维护的问题, 防止出现放气、漏气现象。因此所有的零部件必须是非放气材料, 与外界大气接触的每一个位置都不得漏气, 这是设计中必须坚持的原则。

3.5 电离泡及束光学系统的改进

原设计中, 由于屏蔽间的大间距致使腔到六极磁铁距离过远, 为满足束光学距离要求, 必须将电离泡“深埋”于离子泵中, 导致电离泡相关部件的繁琐设计, 并且氢气的导入也费尽周折。新的设计中由于腔底厚度较原先大为缩小, 为满足原子束光学距离, 必须将电离泡从泵里“拉”出来, 调整颈部长度, 使电离泡正好跟法兰盘在同一平面上, 氢气直接垂直导入不需转弯, 也有益于电离泡的散热, 大大简化了设计, 降低了加工难度。从图 2 和图 3 中可

以清楚地看出新设计的优越。

3.6 部分电子学部分的设计改进

脉泽信号导出线和变容二极管调制线。原先设计中此二线从束光学通道中走线, 然后经过泵体引出, 过长的走线使脉泽信号容易受外界干扰。新的设计构想中此二线直接穿过底屏蔽垂直引出至颈部, 引线不再出现弯折且长度大大减小, 这对脉泽信号的输出十分有益。

C 场与加热炉导线的改进全部采用不放气的导线代替原导线, 让各层的引出线通过每一层底板的开孔汇集于真空底板处, 最后通过一个 31 芯的真空接插件与外界相连。电子学部分新的设计对真空环境的维护、信号的保持、磁屏蔽的设计都有所帮助, 而其自身也大大简化。

3.7 物理部分装配的设计

图 3 中体现出了新设计与以前设计装配的不同, 最明显的改进体现在腔泵连接和漂浮板的固定上面。原设计是将腔泡封闭于真空罩内通过一个长颈与泵相连, 然后把各个屏蔽层套上, 最后把漂浮板通过螺纹旋紧在上面, 这样致使颈部承重很大, 且费料严重。新设计中, 直接在真空基板上焊接三根螺杆, 把各金属层用塑料王间隔后串在上面用螺丝紧固。漂浮板较原设计扩大了内径减小了厚度, 同时将它上面的补偿块改成等间距分散的支柱。新的设计既简化了加工流程又降低了材料的使用量。另外, 辐射罩的安装也较以前简化了许多, 由于该部分的真空罩挪到了外面, 辐射罩直接用漂浮板托住后螺钉紧固即可, 省去了很多压环、螺孔、螺钉, 降低了机加工难度, 简化了装配流程。

4 结束语

重新设计后的氢脉泽物理结构尺寸比原先的在直径上减小了大约 100mm, 因此重量也相应显著下降, 同时, 无论对用料、加工装配, 或者对指标的保持甚至提高都有改善。我们有理由相信, 在后续的加工装配和实验室性能指标测试中新设计都将取得满意的结果。

致谢 感谢上海天文台时频中心的老师与同学给予的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 翟造成. 中国科学院上海天文台年刊, 2007, 28: 142
- [2] 尼古拉·德米朵夫. 宇航计测技术, 2007, 增刊: 7
- [3] Jacques Vanier, Claude Audoin. The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards. Britain: Adam Hilger Press, 1988: 958
- [4] 翟造成, 张为群, 蔡勇等. 原子钟基本原理与时频测量技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2009: 2

Design of Double Vacuum System for Active Hydrogen Maser

WANG Wen-ming^{1, 2}, DAI Ke^{1, 2}

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;*
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

Abstract: As a modern high-precision time and frequency standard, Hydrogen atomic clock is playing an important role in the filed of the basic theory, navigation and communications. With the development of space science and technology, small-sized, transportable and high-performance hydrogen atomic clock research is imperative. This paper describes a kind of double vacuum system design for active hydrogen atomic clock and makes comparison with the traditional designs.

Key words: active hydrogen maser; small-size; double vacuum system