

原子时间和原子频率标准

翟造成

(中国科学院上海天文台)

时间和频率都是重要的物理量。它们的标准建立,在生产斗争和科学实验中无疑有着重要的意义。

任何一种计时基准都是以均匀的周期现象为基础的。过去,传统的时间基准是地球的自转周期,用平太阳日的 86,400 分之一一定为一秒,称为“世界时”。但是由于地球自转并不完全均匀,因此以地球自转为基准的世界时的准确度只有 10^{-8} (相当于三年误差一秒钟)。为得到更准确的时间标准,1956年国际计量委员会第 10 次会议规定,以 1900 年 1 月 0 日 12 时相应的回归年的 31,556,925.9747 分之一一定为“历书时”的一秒,它是地球绕太阳公转周期作为计时标准,实际实现的准确度也只有 1×10^{-9} ,而且确定它非常费事。科学技术的发展,特别是军事和空间技术的迅速发展,对时间和频率的计量准确度要求越来越高,既要求准确的时刻,也要求准确的时间间隔。以地球自转或公转周期为基准的天文时的准确度已不能完全满足要求。为了提高时间和频率的计量准确度,人们寻找新的途径,把计量基础由宏观世界转向了微观世界,即利用物质的微观系统(原子、分子、离子等)的某些特性来作为计量基础。

1954 年左右,美国的汤斯(Townes, C. H.),中国的王天眷等人制成第一个氨分子振荡器^[1,2],此后,逐步形成了一门崭新的边缘科学——量子电子学。这种量子电子学器件作为振荡器的特点在于:振荡频率极为单色,稳定度极好,而且可以不依赖于其它标准而实现频率的再现,因而为时间和频率提供了更高标准——原子频标和原子钟。由于原子频标的出现,使时间频率计量准确度出现了一个飞跃,目前准确度已达 10^{-13} ,并还在向前发展。1967 年第 13 次计量大会决定,以铯¹³³原子的

$$(F = 4, m_F = 0) \longleftrightarrow (F = 3, m_F = 0)$$

两个能级间的跃迁频率的 9,192,631,770 个周期所持续的时间作为一秒,并于 1972 年采用国际原子时守时。

由于原子频标的准确度稳定度极高,用途也广,二十年来发展非常迅速。本文将对原子频标的基本原理、种类和性能、最新进展以及某些应用作一简单介绍。

一、基本原理

原子频标通常由三部分组成:量子器件(原子激励器,原子谐振器等)、被控信号源(晶体振荡器等)和电子伺服系统。

1. 能量的量子化和量子跃迁

众所周知,宏观物体可以具有各种能量,并且其大小是可以连续变化的。然而微观系统(原子、分子等)却不是这样,它遵守量子力学规律。

根据量子力学,原子内部运动的能量只能具有某些固定的不连续的数值 E_1, E_2, \dots, E_n , 它们称为能级(图 1)。每一种原子都具有自己特定的能级。最低能级 E_1 具有最小能量,称为基态。其它能级 E_2, E_3, \dots, E_n 称为激发态。

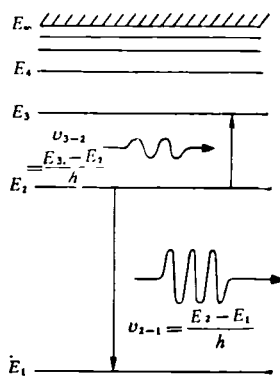


图 1 原子的能级示意图

原子能级既由自己的内部结构决定,同时也受外界电磁场的影响。当原子从一个能级跃迁到另一个能级时,它以一个光子的形式辐射或吸收电磁能量(见图 1)。光子的频率满足 $\nu_{21} = (E_2 - E_1)/h$, 这里, $h = 6.62 \times 10^{-27}$ 尔格秒,为普朗克常数; ν_{2-1} 称为能级 E_2, E_1 之间的跃迁频率。容易看出,产生跃迁的两能级之间的能级差越大,跃迁时辐射或吸收的电磁波频率就越高。因而根据两能级 E 值差的大小,跃迁频率可以从 X 射线区、光波区,到无线电微波区。而后者正

是我们所感兴趣的，现在实用的原子频标大都属于这个频段。

2. 原子的超精细能级

原子能级的超精细分裂是由于电子和原子核存在自旋运动并相互作用而引起的，电子磁矩相对于核磁矩的不同取向将对应着不同的附加能量。根据量子力学，电子相对于原子核的取向不是任意的；对一个价电子的原子，在基态时，它只能平行或反平行于核自旋，这样便对应地有两种能量，即构成原子的超精细能级。这两个能级之间的跃迁频率常用作原子频标的标准频率。由于能级数值高度确定，因而频率也是高度准确的。

在有外磁场的情况下，每一个超精细能级由于塞曼 (Zeeman) 效应将按 m_F 的不同进一步分裂成不同的次能级，这里 m_F 表示原子总矩 F 在外磁场方向投影的量子数。这些次能级的距离与磁场大小有关，在弱均匀磁场下，当 $m_F = 0$ 时，它近似地与磁场的平方成比例；当 $m_F \neq 0$ 时，线性地依赖于磁场。在原子频标中，常选择 $m_F = 0$ 的两超精细能级之间的跃迁作为工作频率。

3. 标准信号的产生及控制

原子频标，从其产生标频信号的方式看，可分无源和有源两种类型。无源的是指量子谐振器一类。有源的是指量子振荡器一类。

(1) 量子谐振器

必须通过控制晶体振荡器来得到标频信号。某一能级的原子在谐振腔中停留一段时间，谐振腔中通入激励原子跃迁的微波信号，当腔内微波频率变化到正好等于上下能级的跃迁频率时，原子产生最大的感应跃迁。对这个跃迁信号进行检测，并把检测信号馈送到产生激励信号的晶体振荡器中去进行控制，使晶体振荡器的频率同步于原子跃迁频率。

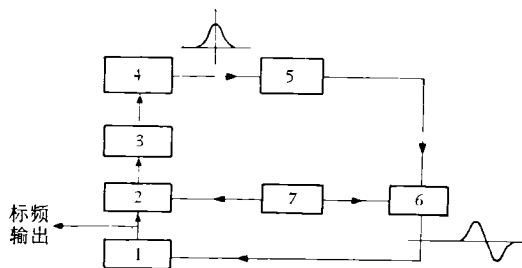


图2 无源型原子频标方块图

1—晶振， 2—相位调制器， 3—倍频器，
4—原子谐振器， 5—谐振信号放大器，
6—相位检波器， 7—调制用振荡器

在这种频标中，激励谐振腔的微波振荡往往是晶体振荡器输出经多次倍频得到的。控制系统如图2所示。晶体振荡器的输出，通过频率综合器和倍频器，产生接近于原子跃迁频率的微波信号。用一低频信号对它进行调制。此微波信号与原子相互作用而获得跃迁信号，经放大与检相后转换成直流误差信号，通过适当的滤波器而控制晶体振荡器。标频信号就由被稳定的晶体振荡器输出。

(2) 量子振荡器

谐振腔无需外部激励，只要系统工作在一定正反馈条件下，进入腔中的高能级原子束有足够的强度，在腔中产生的电磁场能量足以补偿谐振腔的损耗，系统就开始振荡。这种自持振荡的能量直接来自原子本身。这种振荡器当受激辐射频率在微波段时称微波激光器，在光频段称激光器。标频信号直接来自原子跃迁。控制系统如图3所示。它实质上是一个锁相环路，

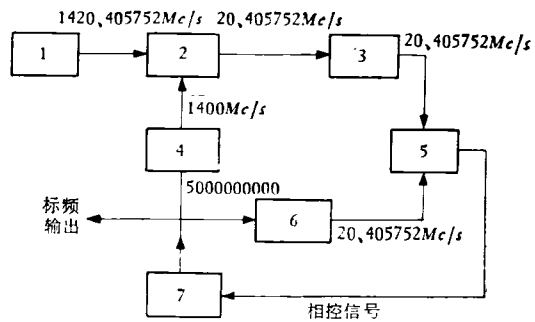


图3 氢原子频标方块图

1—氢原子振荡器， 2—混频器， 3—中频放大器， 4—倍频器， 5—相位检波器，
6—频率综合器， 7—晶体振荡器

晶体振荡器输出经倍频后获得一频率接近微波激光器的输出频率的微波信号，两者混频差拍后的信号被放大。另一方面，从晶振输出综合出一与差拍频率一致的信号，它与差拍信号检相后控制晶体振荡器。在这种系统中，无需对微波信号作频率调制。

二、种类和性能比较

自1954年左右第一架原子钟问世以后，原子频标发展已有二十年历史，出现了各种类型的原子频标，许多新型标准陆续出现。这里主要介绍比较成熟的或有初步结果的原子频标。

1. 比较成熟的种类

有源量子振荡器主要有氨分子激光器、氢原子激光器、铷汽泡激光器等。还有一种即激光，用作频率控制引起了人们极大注意。无源量子谐振器有铯原子谐

振器、铯原子谐振器、氧化钡分子谐振器、铷汽泡标准以及储存束管等。在这些原子频标中,以铯原子频标、铷原子频标和氢原子频标较为成熟、实用,并且有代表性,简述如下:

(1) 铯原子频标

铯原子的超精细能级如图4所示,铯原子束谐振器的结构和工作原理如图5所示。常温下为固体的铯

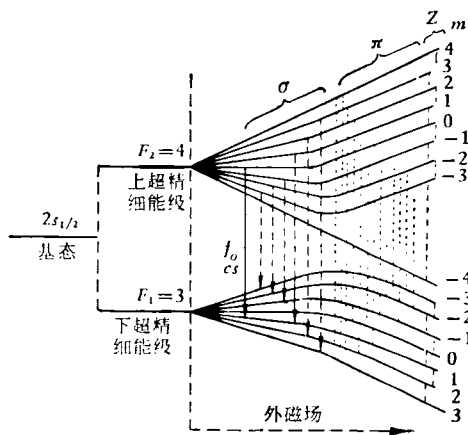


图4 铯原子的超精细能级

在铯炉中气化得到铯蒸气,从小孔O被准直后射入 10^{-7} 毫米汞柱的高真空室(谐振器所有部件都在此真空室内),形成铯原子束。当原子束进入具有很大磁场梯度的态选择磁铁A时,将铯原子束按两超精细能级($F_1=3, F_2=4$)分开,使其中一束(或两束)进入波导相互作用范围(谐振腔)。如果腔内通入接近

$$(F=4, m_F=0) \leftrightarrow (F=3, m_F=0)$$

跃迁频率的外来信号,进入腔的原子就产生感应跃迁。由谐振腔出去的原子有发生了能级跃迁的原子,也有未发生能级跃迁的原子,它们进入与磁铁A同样的磁铁B中被重新分类,已发生了跃迁的原子落到表面电离检测器,被离解为正离子。因此测量离子流就等于测量已发生了跃迁的铯原子流的流量。并且当外激励

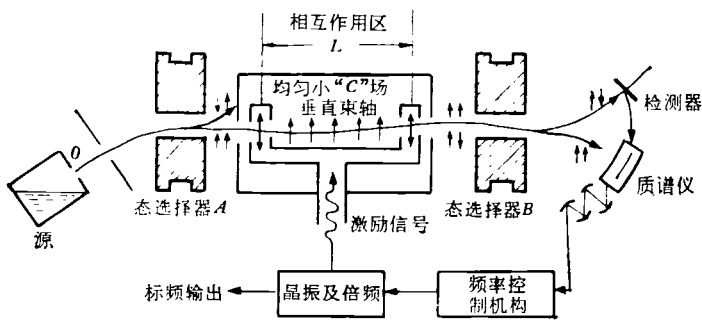


图5 铯原子谐振器的结构原理图
(图中 $\uparrow\uparrow$ 与 $\uparrow\downarrow$ 表示电子自旋与核自旋平行与反平行)

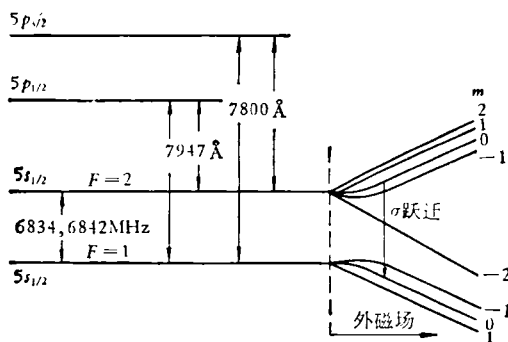


图6 铷(Rb^{87})原子的超精细能级图

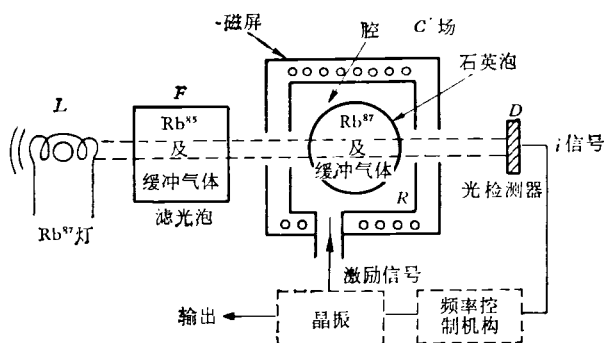


图7 铷汽泡频标结构原理图

信号准确等于跃迁频率时,得到最大离子流,从而检测到谐振。如果激励信号频率偏离跃迁频率时,则离子流减小,因此可以用这个误差信号通过频率控制系统始终将晶体振荡器的频率稳定在原子跃迁线峰值上,从而提高了晶体振荡器的稳定性和准确度。

(2) 铷汽泡频标

铷原子的超精细能级如图6所示。铷汽泡频标的结构和工作原理如图7所示。铷灯发射两种最强的光线 7800 \AA (相应于 $5p_{3/2} \rightarrow 5s_{1/2}$ 跃迁),和 7946.6 \AA (相应于 $5p_{1/2} \rightarrow 5s_{1/2}$ 跃迁)。光线经过滤光泡,这滤光泡由 Rb^{85} 和缓冲气体氦等所填充,缓冲气体的目的是加宽 Rb^{85} 的吸收线。我们看在这里会发生什么,为了清楚起见,将 Rb^{87} 和 Rb^{85} 的能级简化,并且画出两者的谱线图。由图8可见, Rb^{87} 的线a和 Rb^{85} 的线A部分重叠,而线b和线B完全分开。显然当光线由 Rb^{87} 灯射出到滤光泡后, Rb^{85} 将部分地吸收a线,而不吸收b,使b线(相应 $5p_{3/2} \rightarrow 5s_{1/2}$)通过滤光泡而到达腔中的共振泡R上,它激励泡R中低能级 $F=1$ 的原子到激发 $5p_{3/2}$ (或 $5p_{1/2}$)。 $5p_{3/2}$ 的原子由于自发辐射等几率地回到 $F=2$ 和 $F=1$ 能级。这过程的总的

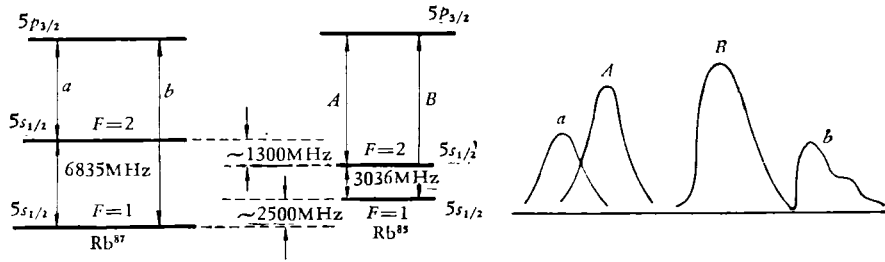


图8 铷原子 Rb^{85} 和同位素 Rb^{87} 的能级

效果是把 $F = 1$ 态上的原子抽运到 $F = 2$ 态上。经过多次循环,最后 $F = 1$ 的原子几乎全部被抽运到 $F = 2$ 态上,而共振泡 R 此时不再吸收 b 线而成为“透明的”。这时如果谐振腔是调谐在跃迁频率上,并且对腔输入一个等于跃迁频率的信号时(由石英晶体振荡器倍频得到),则原子的

$$(F = 2, m_F = 0) \rightarrow (F = 1, m_F = 0)$$

跃迁被感应,而回到 $F = 1$ 态,同时又开始吸收射到泡 R 上的光而又被抽运到 $F = 2$ 态。这样感应辐射的原子数愈多, R 泡中吸收的光就愈多,到达光检测器 D 的光量就愈小,光检测器的输出电流就愈小。当腔的输入信号准确地等于跃迁频率时,光电流达到最小值。

光检测器输出信号通过伺服机构可以把晶体振荡器频率稳定在 Rb^{87} 跃迁线上,从而提高了晶体振荡器频率稳定性和准确度。

(3) 氢原子激光器

氢原子基态超精细能级如图9所示。氢原子激光器的结构和工作原理如图10所示。氢分子在束源 A 中经射频放电,离解成氢原子,经过喷嘴射入高真空室,进入态选择磁铁 B 。原子在这非均匀磁场内将被分类: ($F = 1, m_F = 0$), ($F = 1, m_F = +1$) 的高能级原子被聚焦到储存泡 G ; 而低能级 ($F = 1, m_F = -1$), ($F = 0, m_F = 0$) 的原子被散焦。储存泡用聚四氟乙烯涂敷内壁,进入泡中的高能级原子与其碰撞平均约 10^5 次后由入口逸出。原子在泡中停留大约一秒的时

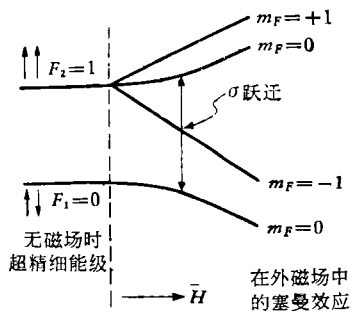


图9 氢原子的超精细能级
(图中 $\uparrow\uparrow$ 和 $\uparrow\downarrow$ 表示 S 与 I 平行与反平行)

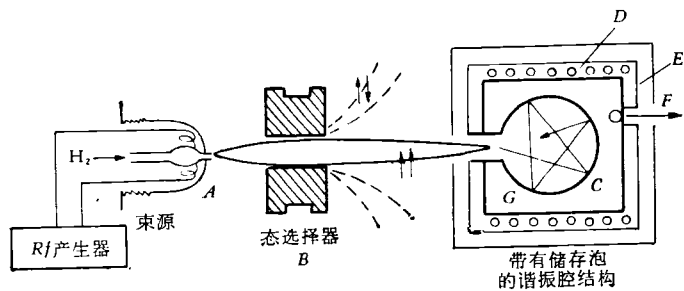


图10 氢原子激光器的结构及工作原理
(图中 $\uparrow\uparrow$ 与 $\uparrow\downarrow$ 同图9)

间(称储存时间),储存原子是为增加激发态原子寿命,提高激光器稳定性。

石英储存泡被谐振腔包围着,而腔是预先调谐在跃迁频率上的。高能级的原子进入泡后,由于腔中存在着相应于跃迁频率的噪音,它激励原子进行跃迁,发射光子,产生振荡。振荡信号由谐振腔耦合出来以供各种目的。如果它通过自动控制系统把晶体振荡器的相位锁定到氢激光器相位上,则在理想情况下,晶体振荡器频率稳定性、准确度就提高到和氢原子激光器一样。

2. 仪器特点和性能比较

铷原子频标由于它不需要真空系统、致偏磁铁和原子束,因而体积小而轻便。它有高的短期稳定性,其长期稳定性比一般的石英振荡器高,这对许多应用来说,已经够了。在使用上并不需要长时间的预热,但是它存在由于 Rb^{87} 与缓冲气体碰撞引起频移,而且这频移依赖于气体的压力、纯度和温度,故它只能用作次级标准。

铷原子频标与其它原子频标相比有很高的准确度和长期稳定性,这使它能用作基准而无需校准。

铷钟有两种:一种是实验室型,其体积大,结构比较复杂,但准确度较高,可用作频率基准;另一种是轻便型,与前者相比,其主要特点是体积小,重量轻,使用方便,价格较低,可靠性高,信噪比良好,并能长期连续运转;但准确度较低,已成为商品生产。

氢原子激光器与现在通用的原子标准比较,有最

表 1 三种原子频标的特性

种类	频率 (Hz)	系统漂移	稳定度		准确度	标准类型	工艺水平	参考文献
			秒	时				
铷汽泡频标	6.834×10^9	$2 \times 10^{-11}/\text{月}$	5×10^{-12}	5×10^{-13}		次级工作标准	较高	[20]
铯原子束频标	9.192×10^9	在寿命期间 $< 1 \times 10^{-12}$	5×10^{-11}	1×10^{-12}	1×10^{-13}	原始	较高	[20, 26, 27, 33]
氢原子束脉泽	1.420×10^9	在寿命期间 $< 1 \times 10^{-12}$	5×10^{-13}	7×10^{-15}	1×10^{-13}	原始	较高	[20]

高的短期稳定度和长期稳定度和很好的再制性。但是准确度由于受原子壁碰撞频移的不确定性影响, 不见得能超过铯标准。但壁移的影响还是有希望能逐步减小的。氢标准的体积重量也较大。

现将铷汽泡频标、铯原子束频标和氢原子束脉泽三种原子频标的特点、性能择要列于表 1。

三、原子频标的新进展

近年来原子频标的发展相当迅速, 新设想和新技术不断出现。下面对近年来的进展情况作一概述。

1. 氢激光器的进一步改进

虽然氢激光器的准确度已达 $1-2 \times 10^{-13}$, 稳定度已超过 $10^{-14}/\text{天}$, 但仍具有潜力。目前, 氢激光器的主要限制是原子与壁碰撞的频率漂移(壁移), 采用十倍于通常的储存泡可以使壁移减小 10 倍^[6]。实验表明, 当泡温度为 80°C 左右时, 壁移通过零点^[7]。为了消除测量中不同泡壁涂敷的不一致性, 制造了可变形的储存泡。将可变储存泡技术与工作在壁移为 0 的温度的氢激光器或与 1.5 米大泡的激光器结合起来将可望得到优于 1×10^{-13} 的准确度^[8]。

氢激光器由于是自激振荡型工作机理, 目前它具有任何实用的原子频标所不可比拟的高稳定度。

2. 原子束型谐振器的继续发展

原子束型谐振器是目前原子频标发展的一个主要方向。由于它是一种被动工作机理, 频率漂移为腔失谐的 $(Q_c/Q_i)^2$ 倍, 这里 Q_c 和 Q_i 分别为腔和原子线的品质因数。与激光器型的 Q_c/Q_i 相比显然是一个有利因素。现在最高准确度的频率标准是铯原子束谐振器, 它的准确度已达 1×10^{-13} ^[9]。

由于原子束型谐振器标准克服了自激振荡型严重的腔体频率牵引效应, 因此新建议的和原已存在的原子频标元素如钙、镁、铷、氢等也都转向束型谐振器结构:

(1) 氢储存束管^[10]

是一个基于老概念的新装置, 如图 11 所示。它介

于氢激光器与铯束管之间。运转原理类似于铯束管, 而储存原理来源于氢激光器。储存泡中放一束挡板, 以阻止直通束。氢储存束管综合了铯束管和氢激光器的优点。准确度预计可达 10^{-13} 。

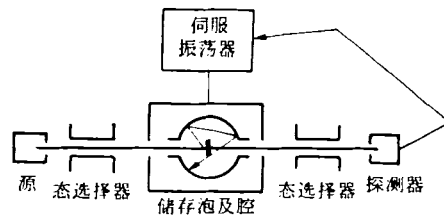


图 11 氢储存束管工作原理

(2) 氢储存束标准

是应用氢原子为工作物的又一种新标准。与氢储存束管相比都是无源型装置, 但又不象氢储存束管那样检测氢原子, 而是检测腔的微波功率, 这克服了要求低背景的氢检测器的低效率问题。

储存束标准方块图如图 12 所示^[11]。来自晶振的 5MC 信号倍 288 倍, 与综合器来的信号(约 19.594MC)混频以产生一个接近氢跃迁频率的信号。这个信号通过微波腔, 并再与来自倍频器和综合器信号混频。如果腔中有高能级原子并且腔是调谐在跃迁频率上, 则氢的共振在灵敏检波器的输出端作为由于离散信号而引起的相位变化将被观测到。含有氢共振相位信息的相检器输出, 送到同步检波器, 它放大滤波后用作晶振的修正信号。

此装置目前稳定度为 4×10^{-13} (30 秒和 3 个小时内)。

(3) 氢原子束谐振器

是最近发展起来的采用氢原子束的一种无源型装置^[12]。这种装置使氢原子脱离了氢激光器储存泡成为原子束状态, 从而消除了“壁移”使准确度有可能提高到 1×10^{-13} 或更小。

实验装置结构和工作原理如图 13 所示。可见实验布置与运转原理类似于铯原子束。所不同的是在内外屏蔽之间在两端对称地安置了 A、B 极化环。这些环产生一个沿束轴的小磁场使局部地区的磁场近乎为

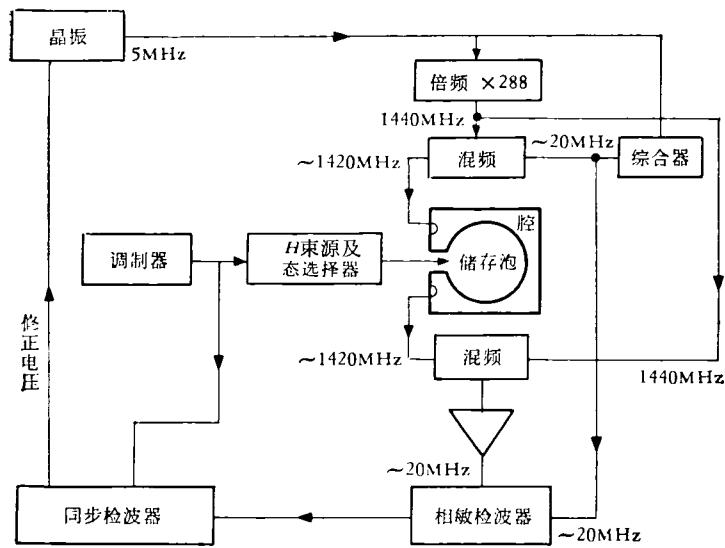


图 12 氢储存束标准方块图

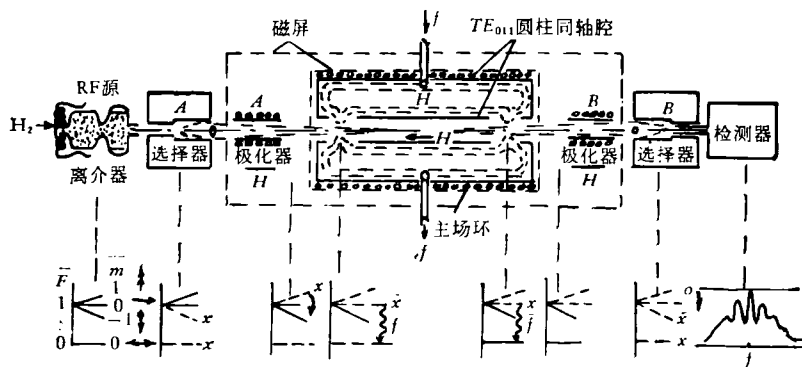


图 13 氢原子束谐振器结构原理

0. 由于原子磁矩在弱场下的拉莫尔进动变慢,因此当原子通过屏蔽孔时自旋轴不显著改变方向,因此放置腔的内屏蔽范围中的磁场的方向确定其中量子化轴;而且在这范围之内,原子可以处在不同的态,这种现象称非复变跃迁。在原子束的许多应用中,这种跃迁是要避免的。但是在现在的情况中,为了消除在检测器上某些不希望的原子态,或者按需要控制腔相互作用范围中原子磁矩的取向,这种技术是有用的。

腔是一个同轴圆柱结构,它共振在 TE_{011} 模式,内导体在靠近终端处断开,射频磁场在此处与束耦合。这是一个简单的分离振荡场结构,在那里外加射频使磁取向垂直于束轴的原子产生跃迁。在理想的磁场条件下,这些跃迁将全部是 $(F = 1, m = 0) \rightarrow (F = 0, m = 0)$ 跃迁。

根据初步的实验结果,由于氢的超精细结构能级简单,并对磁场的敏感性比铯小,而且腔引起的干扰与偏差较小,估计扣除各项误差影响以后,氢束标准的准确度能力还有可能达到 1×10^{-13} 或更小。预期完全

可能有 3×10^{-11} /天的稳定度。可以肯定,对于那些同时对准确度,重调性以及长、短期稳定度要求很高的使用者来说,氢束谐振器将会受到很大的重视。

此外,束型谐振器方面还有离子储存管^[13], 钙、镁束谐振器^[14], 光抽运原子束谐振器^[15]等一些较新的发展,这里不再一一说明。

3. 激光用于频率稳定^[16]

这是最近发展起来的新型标准。它在红外范围作为高准确度的频率标准很有前途,并且在时间,频率和长度基准合一方面具有重要的意义。

(1) 激光照射碘分子束吸收

此种装置结构原理如图 14 所示。作为伺服振荡器的激光,垂直照射碘分子束,由于束的吸收产生光强的变化,被检测器检测,通过伺服控制回路将激光器的频率稳定到 10^{-13} 。

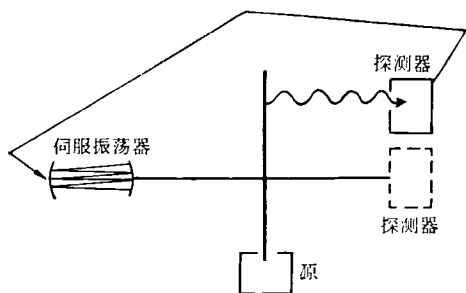


图 14 束吸收原理

(2) 激光照射甲烷的饱和吸收

结构原理如图15所示。作为伺服振荡器的激光照射到甲烷分子产生光的饱和吸收。在不同压力、温度和实验条件下，由于排除了一级多普勒效应和碰撞分子对相互作用的影响，吸收线中心的频移非常小。使用锁相技术，频率重调度可达 10^{-11} 。

有人预见，光频标可达 10^{-17} 的稳定度，达到了量子温度和起伏的极限。目前已实现相对稳定度 $\sim 10^{-14}$ 。

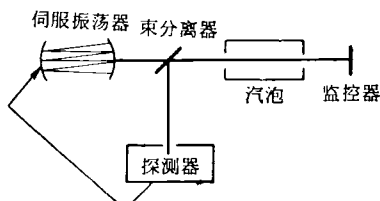


图 15 饱和吸收

以上是原子频标发展最为活跃的三个方面。可以肯定现有技术的重大改进和完全新型的设想都将不断涌现，使原子频标技术不断地提高到新的水平。

四、一些应用方面

原子频标的出现，使时频基准的准确度产生了一次飞跃。可以这样说，原子频标的出现，是时频计量工作的一次革命。自从铯原子钟成了一般公认的时频基准后，时间频率基准正式由实物基准转变成成为自然基准。这种基准的准确度是所有计量基准中最高的。因此原子频标的发展对现代科学和技术产生着重要的影响。它已广泛应用于工业、军事、以及科学实验等许多部门中，随着原子频标的发展，新的应用范围正不断扩大。

高性能的原子频标的发展，使自然科学建立新的理论和重新估价现有理论成为可能，因为为此而正在进行和提出的某些科学项目取决于原子钟稳定度准确度这样的频率源。

例如，原子频标能比用穆斯堡尔效应更高的精度

测定频率的重力漂移。

再如国外用雷达和射电望远镜进行了一项相对论实验。在一个实验室中，雷达脉冲用来跟踪当行经太阳之后的金星和水星。按照爱因斯坦预测，当能量刚一触及太阳，脉冲的传递时间将增加约 $130\mu\text{s}$ (在历时 25 分钟内)^[17]。这里，原子频标作为控制着定脉冲时间的钟就成为必要的。

正在进行的另一个相对论试验是红偏移实验。把一个包含二个氢激光器的时钟系统射入同步轨道，测量重力效应对时间的影响。然后将这个钟的速率与地面同样钟的速率相比较。按照相对论，如果处于不同重力位，各自在其特有的惯性参考系中运转的两个钟，其相对速率将有差异。相对论预测，由于重力偏移和其它轨道效应，轨道中的钟将比地面上的钟每天快 $46.5\mu\text{s}$ 。如果真是这样，相对论的一个重要方面将被得到证实。

射电天文学，特别是长基线干涉仪正用来测量包括类星体，脉冲星和窄带 OH 辐射等各种小角度的射电源的大小、位置和特性。在长基线干涉仪中，通过两个相距数百里或数千里的天线，观察同一射电源。观察数据计算结果的精确度取决于两信号关联时间长度，还受二观察站本机振荡器保持相位相干时间长度的限制。本机振荡器要由稳定度很高的原子频标来担任。

使用 NH_3 , OH 或其它一些分子谱线(它们的辐射只在宇宙中才呈现)的原子频标，通过频率漂移的测量，可以精确地测定在宇宙的不同区域银河系间气体的运动情况，从而知道某些关于银河系结构的信息。

目前讨论的一些与宇宙的形成有关的效应，例如宇宙常数(如电子的电荷与质量，普朗克常数，重力常数等)随时间的变化，用原子钟可以精确检验。

由于原子时间频率基准的准确度是所有计量基准中最高的一种，因而其它基准如长度、电压、低温等都和时频基准发生联系，借此提高它们的准确度。

长度的单位是以氪 86 谱线波长定义的。由于光频标(甲烷稳定激光器)的出现，准确度比氪好几个数量级。有可能以频标工作中利用的精度和准确度把微波标准频率联结到红外和可见光频率上。光在真空中的速度 c ，可以因此成为确定的量并且时间和长度的单位，可以基于相同的原始基准，统一了基本物理量。光速 c 的最准确值可以来自长度标准的频率测量，已经以九位数字的精度测定了光的速度 ($c = 299792460$ 米/秒)。今后的任务还要以更高的精度测定这个物理量。

在现代工程和技术中，原子频标同样有着广泛的应用。尤其是在军事上起着特别重要的作用。原子频标在空间制导及导航、宇宙飞船的时间控制、火箭和导弹的跟踪、飞机防撞、电码通讯和各种导航台中是一种

很重要的设备。

另外,原子频标在大地测量、电波传递速度和电离层研究等方面也有着广泛的应用。

五、结 束 语

综上所述,在各类原子频率标准中,铯原子钟准确度最高,目前已实现 $1-2 \times 10^{-13}$ 。1967 年以来,国际权度局已正式用它作为国际单位制中秒的单位,是公认的目前准确度最高的绝对原始标准。铯原子钟在整个原子频标的发展中起着它的重要历史作用,毫无疑问,铯原子钟还应继续发展和改进,以求更高性能。

从原子时尺度的角度来看,实验室型的大铯束钟有资格作为国家基准,其它原子钟,甚至商品小铯钟,由于复制性差,必须经与铯基准校核后连续工作方能获得统一的原子时尺度。并且由于原子频标的频率有偶然误差和系统误差存在,一旦校准之后也不能长期保持固定不变,因而每经一段时间后又必须再进行校核。因此建立原子时尺度目前仍离不开长铯束基准。而且原子时尺度的准确度取决于铯基准的准确度。由于这些原因,实验室型的长束铯基准如能长期连续运转,直接建立原子时尺度将比现行的方法所建立的原子时尺度准确度要高。

从稳定度方面看,从 100 秒到一个月的时间内,以氢原子激光器为最高,已达 10^{-15} 量级,这是氢原子激光器的一大特长。正如前面谈到的,它在某些现代科学实验项目中发挥着显著作用。氢原子激光器由于存在壁移,以及输出信号中存在调频闪变噪声,严重妨碍它成为基准。尽管最近改进型氢激光器(可变储存泡脉泽和大泡-可变泡脉泽)已实现壁移修正到 2.4×10^{-13} ,这还是初步结果。但它象铯钟那样成为公认的基准还有待进一步考验。

从作为基准的发展角度来看,最有希望的看来是氢原子束钟,与铯比较运转方式类似,由于某些修正项误差较铯小,据初步实验结果估计准确度好于 1×10^{-13} 。看来对准确度,复制性以及长、短期稳定度同时为最重要要求的那些应用上,氢束钟很大程度上具有前途。

秒级以下的稳定度以甲烷饱和吸收的氦氟激光频标为最高。准确度估计也可达到 10^{-15} 量级,但它必须和微波频段频率衔接起来才有意义,这是一个难点,有待进一步发展。

我们已经知道,原子频标对科学的发展产生着重要的影响。随着国防工业和科学技术的迅速发展,对频率(时间)计量精度的要求越来越高,因此,自从以微观粒子内在永恒性为基础的原子钟问世以后,在科学技术领域中产生了重要影响,引起各国注意。同样,我国也给予了极大重视,从 1958 年开始,许多工

厂、科研单位和大学对原子频标从事了理论探索和研制工作,至今将近 20 年的历史。

20 年来,由于国家的重视,我国原子频标发展很快,取得了很大成绩。各种主要类型的原子频标都进行了研制,而且大多研制成功或即将成功,并有相当高的技术性能。有的原子频标已投入使用或试用。有的频标并有小批量的生产。这些原子频标的研制成功和应用,对现代国防,科学技术产生了重要的作用。

目前,我国原子频标的发展,一是继续提高性能,一是进一步小型化、精密化,提高可靠性。同时还开展了新型原子频标的研制工作。我们相信,坚持独立自主、自力更生,一定能够在不久的将来赶上和超过世界先进水平,满足我国飞速发展的国防工业和科学技术发展的需要,为加速实现四个现代化和支援世界革命作出贡献。

参 考 文 献

- [1] Gordon, J. P., Zeiger, H. J. and Townes, C. H., *MASER — A New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard and Spectrometer*, *Phys. Rev.*, **99** (1955), 1264.
- [2] Shimode, K., Wang, T. C. and Townes, C. H., *Further Aspects of Theory of the Maser*, *Phys. Rev.*, **102** (1956), 1308.
- [3] Никальский, И. А., *Квантовые Усилители*, *М. Радио, Изд. Энергия* (1964).
- [4] Косырев, Е. А., *Молекулярные Генераторы и Усилители Сверхвысоких Частот*, Москва, (1963).
- [5] Генкин, В. И., *Новые Зарубежные Элек. Приборы, Серия радио Элек. и связь*, **8** (1972).
- [6] Uzgiris, E. E. and Zimsey, N. F., *Multiple-Region Hydrogen Maser with Reduced Wall Shift*, *Phys. Rev.*, **A1** (1970), 429.
- [7] Zetzewitz, P. W. and Ramsey, N. F., *Studies of the Wall Shift in the Hydrogen Maser*, *Phys. Rev.*, **A3** (1971), 51.
- [8] Ramsey, N. F., *History of Atomic and Molecular of Frequency and Time*, *IEEE. Tran. on Instr. and meas.*, **Im21-2** (1972).
- [9] Kartaschoff, P. etc., *Standard Time and Frequency Generation*, *PIEEE.*, **60-5** (1972), 403.
- [10] Hellwig, H., *The Hydrogen Storage Beam Tube, A Proposal Standard for a New Frequency Standard*, *Metrologia*, **6-2** (1970), 56.
- [11] Hellwig, H. and Bell, H. E., *Some Experimental Results with an Atomic Hydrogen Storage Beam Frequency Standard*, *Metrologia*, **8-3** (1972), 96.
- [12] Peters, H. E., *Hydrogen as an Atomic Beam Standard*, *Proc. of 26th Ann. Symp. on frequency contr.*, (1972), 230.
- [13] Schuessler, H. A., *The Ion Storage Tube, A* (下转第 96 页)