

原子钟

仇九子

时间是最基本、也是最常用的物理量之一。对时间的计量不仅需要计时系统——时钟，而且还要有一个精确的时间标准。任何一个具有稳定的周期性运动的系统都可以用于计时。但要用做时间标准，还要求它能够长期、稳定地维持这种周期运动。频率是周期的倒数。因此，一个稳定的频率计就是一个稳定的时钟。时间的精确度与频率的精确度是一致的。

地球相对于太阳的自转和公转都是稳定的周期运动。因此，地球和太阳是一个天然的计时系统。人们最早选用的时间标准就是以地球相对于太阳的公转与自转为基础的，称做世界时。在现行的国际单位制中，时间的单位是秒(s)。1秒规定为一个平均太阳日的86400分之一。由于地球在自转的过程中受潮汐和其他力学因素的影响，其自转的角速度存在着微小的波动。因此，由地球转动给出的时间单位(秒)有一定的偏差。其精确度约为 10^{-8} ，即约3年差1秒。后来经过长期的天文观测修改后产生了运行更均匀的历书时，其精确度约为30年差1秒。然而，这种依赖天文观察的时标对日常使用很不方便。于是人们发明了用于日常计时的二级时标，如古代的日晷和刻漏以及近代的机械钟表和石英钟表等，用它们来体现具体的世界时。

尽管机械钟表和石英钟表的稳定性可以达到很高(优良的重力摆钟的稳定度可达 10^{-8} 量级，石英钟表可达 10^{-13} 量级)。但是机械钟表和石英钟表，一方面由于存在着个体差异，而且易受环境因素的影响；另一方面由于磨损、老化等原因，都有一定的使用寿命，不能长期稳定地工作。所以，机械钟表和石英钟表都不能代替以地球转动为基础的时间标准。

然而，50年代初诞生的原子钟由于其振荡频率仅与原子本身的性质有关，且具有极高的稳定性和精确度。加上原子存在的普遍性和长久性，使原子钟不仅成为新一代高精度、高灵敏度的计时系统，而且成为继天文时标之后的又一更高级别的时间标准。最好的铯原子钟的精确度可达 10^{-13} ，比天文时标高5个量级。因此，1967年第13届国际计量大会决定以零磁场下铯(^{133}Cs)原子基态两个超精细结构能级之间的跃迁频率作为国际通用的频率标准，定义与它相应的电磁波持续9 192 631 770个周期的时间为1秒，即原子秒。现在全球已统一使用原子时标。世界各地共有200台高水平的铯原子钟定时进行协调和对比，由它们共同维持原子时。我国计量科学院建造的两台铯原子钟在1981年通过鉴定，并参与世界原子时的协调工作。我国建立了以陕西省天文台为中心的全国统一原子时系统，每天向中央电视台和全国各科研机构提供准确的原子时。

一、原子钟的物理基础

量子力学的研究揭示出，自然界中的原子只能处于一些分立的能量状态，把这些分立的能量状态叫做能级。原子可以自发地从高能级跃迁到低能级，同时辐射一个电磁量子，这种跃迁叫做自发跃迁；原子也可以在电磁波的作用下从一个低能级跃迁到一个高能级并吸收一个电磁量子，或者从高能级跃迁到低能级同时辐射一个电磁量子，这种跃迁叫做受激跃迁。辐射或吸收的电磁量子的频率由玻尔频率条件决定，即有：

$$h\nu = E_k - E_i \quad (1)$$

其中， h 为普朗克常数， ν 为电磁波的频率， E_k 和 E_i 分别为高能级和低能级的能量。由(1)式可见， ν 仅与原子发生跃迁的两能级的能量有关，称为原子相关能级之间的跃迁频率。它是原子

的固有频率,这一频率只与原子的种类有关,即同一种原子相应能级之间的跃迁频率是确定的。而且,这一频率比天文时标具有更高的稳定性和精确度。因此,从理论上讲,原子能量跃迁所产生的电磁振荡不仅可以用于计时,而且还可以将原子做为新的时间标准。

实验表明,当电磁波的频率接近原子的跃迁频率时,原子发生跃迁的几率最大,这一现象叫做共振跃迁。因此,要获得足够大的跃迁几率就必须产生与跃迁频率相一致的电磁振荡。在50年代初,微波技术已趋于成熟,微波是波长在mm—m范围的电磁波。人们通过研究发现,许多原子的基态(能量最小的状态)不是单一的能级,而是由几条相距很近的子能级所组成,称为能级的超精细结构。超精细结构间的跃迁频率正好处于微波区。因此,可以用微波激励原子,使原子的能量在基态的两个超精细结构之间发生跃迁,就可以获得稳定的电磁振荡频率来计时。从50年代起,人们就研制出了铯原子钟、铷原子钟、氢原子钟等。这些原子钟都是用相应于原子固有频率的微波作用于原子,使原子发生共振跃迁,然后再用探测器探测到的跃迁信号控制微波的振荡频率,以获得精确的计时信号。

二、原子钟

尽管原子钟都是以原子的稳定谐振为基础,但是不同种类的原子钟有着不同的构造原理和运行方式。下面以铯原子钟和氢原子钟为例介绍原子钟的结构及工作原理。

1. 铯原子钟

1) 原子磁共振原理

铯原子钟利用的是原子束磁共振原理。这一共振技术是30年代美国物理学家拉比(I. I. Rabi)及其同事发明的。其共振原理如下:

氢或碱金属等原子的电子运动具有磁矩,其方向与电子角动量 J 的方向相反(电子带负电荷);原子核也有磁矩,核磁矩的方向与核角动量 I 的方向一致。一般情况下,核磁矩远远小于电子的磁矩,约为电子磁矩的千分之一。所以,原子磁矩主要是电子磁矩。但是核磁矩

的存在导致原子产生超精细结构。氢及碱金属的基态总是分裂为两条子能级,它们磁矩的方向相反。原子的总角动量 L 是电子角动量 J 与核角动量 I 的矢量和。这时原子的有效磁矩 m 与总角动量 L 的方向相反,且与 L 有如下关系

$$m = -\lambda L$$

其中, λ 是与角动量子数有关的系数,可看作常数。

把原子放入一恒定的匀强磁场 B_0 中,由于原子磁矩的存在,原子将受到一个磁力矩的作用,使原子的总角动量 L 绕磁场 B_0 作进动,如图1所示。其运动方程为

$$dL/dt = m \times B_0 = -\lambda L \times B_0 \quad (2)$$

由上式可得磁矩(或角动量)绕磁场 B_0 进动的角速度为

$$\omega_L = -\lambda B_0 \quad (3)$$

其中, ω_L 称为拉摩频率。

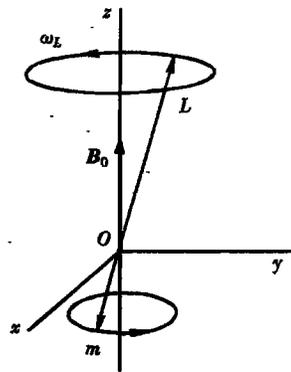


图 1

现在在原子上建立一个绕磁场 B_0 转动的坐标系,由力学定理有

$$dL/dt = (dL/dt)_r + \omega \times L \quad (4)$$

式中, $(dL/dt)_r$ 为在转动坐标系内观察的角动量对时间的变化率, ω 是转动系统绕磁场 B_0 转动的角速度。由(2),(3),(4)式可以看出,当 ω 正好等于拉摩频率 ω_L 时, $(dL/dt)_r$ 为零。即在这一转动系内角动量 L 是不变的。

为了使原子在超精细结构之间发生跃迁,在垂直于 B_0 的方向加一弱的交变磁场 B_1 (假设 B_0 沿 z 轴方向, B_1 沿 x 轴方向),并使其振荡频率等于拉摩频率 ω_L 。为了了解 B_1 的作用,可将

B_1 在 xy 平面内分解为同频率的左旋和右旋圆偏振磁场。假定右旋圆偏振磁场 B_1' 的旋转方向与磁矩拉摩进动的方向一致。则在随原子磁矩一起转动的坐标系上观察,右旋圆偏振磁场是一个加在原子上的恒定磁场。原子要受到这一磁场的磁力矩作用。在这一磁力矩的作用下,原子磁矩在转动系中将绕 B_1' 作进动。假设开始时原子磁矩沿 B_0 方向,则经过一段时间后,原子磁矩将转动到与 B_0 相反的方向上。从量子力学的观点看,就是磁场 B_1 使原子从一个子能级跃迁到另一个子能级。由量子力学可知,当交变磁场的频率等于原子的跃迁频率时,原子发生跃迁的几率最大。把这种跃迁称做共振跃迁。

2) 原子束磁共振装置

原子束磁共振装置是铯原子钟的核心部分。它是由原子束源 S , 选态 (A, B) 与激发 (C, R) 系统和探测器 D 等组成,如图 2 所示。工作时,由加热源产生的原子束先通过一个非均匀磁场 A , 原子磁矩将受到磁场力作用而发生偏转。不同超精细结构的原子有不同的磁矩,因而它们有不同的偏转轨道,只有选定子能级上的原子才能通过磁场 A 进入狭缝。这一过程叫磁性选态。通过狭缝的原子进入恒定磁场 C , 并受到与磁场垂直的射频磁场 R 的作用,调节 R 的频率可使原子发生共振跃迁。此后,原子再通过另一非均匀磁场 B , 该磁场的作用是使已发生量子跃迁的原子偏转运动轨道,到达探测器 D 。未发生跃迁的原子因偏转方向不同而不被探测器接收。实验表明,使原子能发生共振跃迁的射频磁场的频率并不只是跃迁频率 ν_0 , 而是在 ν_0 附近有一线宽 $\Delta\nu$, $\Delta\nu$ 的存在使原子钟的稳定性变差。人们常用共振系统的品质因数 Q 来表征系统的稳定性

$$Q = \nu / \Delta\nu$$

式中 ν 是共振频率, $\Delta\nu$ 是它的不确定范围。显然 ν 越大, $\Delta\nu$ 越小, 则 Q 值越大, 系统的谐振动也越精确, 越稳定。对原子跃迁, 产生 $\Delta\nu$ 的原因是超精细结构的子能级存在一定的能量增宽。在原子束磁共振装置中, 子能级的增宽主

要是由原子和磁场的相互作用引起的。两者的作用时间越短能级的增宽越大, $\Delta\nu$ 值也越大, 共振系统越不稳定。所以, 要减小 $\Delta\nu$, 就必须增大原子与磁场的相互作用时间。

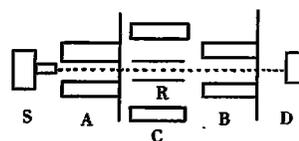


图 2

1949 年美国物理学家拉姆齐 (N. F. Ramsey) 提出的分离振荡场的方法使原子与磁场的相互作用时间大大增加, 约比原来提高了两个数量级。使原子钟的精确度得到了很大的提高。他建议用一个微波源同时馈入两个相距很远 (约 1 米) 的微波腔 (R_1 和 R_2) 产生两个射频磁场。由于原子在两个微波腔之间的磁场中飞行的时间很长, 所以可以获得很小的频率线宽 $\Delta\nu$ 。拉姆齐分离束磁共振装置的工作原理是, 由铯束源产生的铯原子束经过非均匀磁场 A 选态后, 使磁矩平行于外磁场的原子进入外磁场 C 。在磁场 C 中, 原子首先通过第一个微波区, 其穿越时间为 τ 。在时间 τ 内, 原子磁矩 m 在交变磁场 R 的作用下开始偏离 B_0 方向向下旋转。当原子离开第一个微波区时 m 正好转动了 $\pi/2$ 的角度, 即与 B_0 垂直。然后原子进入无振荡区域, 在磁场 C 中继续向前飞行, 飞行时间为 T 。在此期间, 磁矩 m 继续绕均匀磁场 B_0 作拉摩进动, 微波也继续作磁振动。原子在离开无振荡区域后进入第二个微波区, 其穿越时间也为 τ 。如果振荡频率正好等于拉摩频率 ω_L , 则原子进入第二个微波区时磁矩 m 绕 B_0 进动的相位与 B_1' 绕 B_0 转动的相位始终保持一致。因此, 在交变磁场作用下原子磁矩 m 将从 $\pi/2$ 角开始继续向下转动。原子磁矩 m 在第二个微波区内同样转动了 $\pi/2$ 角度。所以, 原子磁矩在第一和第二个微波区内共向下转动了 π 的角度, 即 m 与 B_0 反平行。从而使原子从一个子能级跃迁到另一个子能级。这时的跃迁几率最大。然而, 当振荡频率 ω 在 ω_L 附近有微小偏移致使原子在飞行时间 T 内, 振荡与进动之间恰好

有 π 的相位差时,原子磁矩 m 在第二微波区内将向上转动,最后使 m 回到 B_0 的方向.从而使原子无法发生跃迁.这时对应于跃迁几率最小的情况.所以共振曲线在 ν_0 附近形成了一个狭窄的共振峰.若振荡频率 ν 继续偏离 ν_0 ,可能使原子磁矩在两个振荡场之间产生 2π 的附加相位差,则进入第二个振荡区之后,原子磁矩 m 将沿原方向继续向下转动 $\pi/2$ 角,因而产生另一个极大跃迁频率.所以跃迁几率将在 ν_0 附近以正弦的形式交替变化,形成很窄的起伏条纹,称为拉姆齐条纹,如图3所示.图中 $\Delta\nu_1$ 称做中心条纹宽度,其大小取决于原子在两振荡场之间的飞行时间 T ,有

$$\Delta\nu_1 \approx 1/2T$$

$\Delta\nu_2$ 称做整个共振曲线的宽度,由原子与振荡场的作用时间 τ 决定,有

$$\Delta\nu_2 \approx 1/2\tau$$

由于 T 比 τ 大100倍,因此 $\Delta\nu_1$ 比 $\Delta\nu_2$ 小两个数量级,这便大大缩小了频率的不确定性,提高了频率的稳定度.

3) 铯原子钟的结构及工作原理

铯原子(^{133}Cs)的核磁矩不为零,它的基态超精细结构有两条子能级.这两条能级之间的跃迁频率约为9.2GHz,正处于微波区,可以用这一频率作频标来进行计时.铯原子钟的结构如图3所示.它由铯束源 S ,选态和拉姆齐束磁

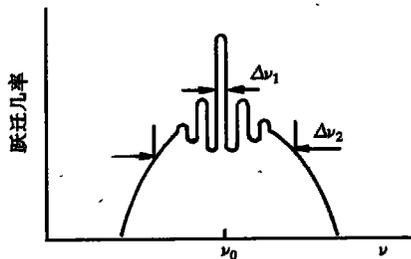


图 3

共振系统,探测器 D ,微波信号源 Z ,伺服系统 I ,分频器 F 以及显示器 H 等部分组成.微波信号源是一个石英振荡器.石英振荡器产生的射频电信号加到微波腔的螺旋管上产生振荡磁场.由于铯原子谐振系统的 Q 值比石英振荡系统高几个量级,因此可将原子谐振系统的信号加在

石英振荡电路中,使石英振荡电路的频率被箝制在铯原子共振频率上,从而大大提高石英振荡器频率的精度和稳定度.具体作法是:在铯原子钟内,把石英振荡器输出的低频信号(通常为3MHz或5MHz)经过倍频与综合,使其频率达到铯原子的共振频率,由它激发微波腔产生射频磁场.原子束在微波腔内发生共振跃迁,其频率值为9 192 631 770Hz.为了使石英振荡器被原子共振频率箝制住,在铯原子钟接收器的输出端接一个称做伺服系统的电路,并将它连接到石英振荡器上.当微波频率有微小偏移时,接收器输出的信号就有一个改变量.伺服系统将这一改变量转变成相应的电压值加到石英振荡器上,从而调整石英振荡频率,并使微波发生器的频率调回到与原子共振频率精确一致的程度.经过箝制的石英振荡器再通过分频器降低信号频率,便输出实用的时钟脉冲,由显示器显示出具体的时间.

通过这样的控制技术,输出频率的不确定度可达到1mHz以下.使铯原子钟的精确度和稳定度均可达到 10^{-13} 量级.所以,铯原子钟是目前世界上性能最好的时钟,也是最好的时间频标.

2. 氢原子钟

氢原子钟是另一种实用的原子频标.氢原子基态的超精细结构有两条子能级.它们的有效磁矩的方向相反.两能级之间的跃迁频率约为1.42GHz.氢原子钟的装置如图4所示.氢原子束经过非均匀磁场 M 选态之后,只能让处于上能级的原子进入一球形玻璃泡.泡内壁涂有聚四氟乙烯膜,其作用是使氢原子与壁碰撞时不损失能量.氢原子经过与壁的多次碰撞才可能从泡口逸出,在泡内驻留时间可长达1s.玻璃泡放在一微波谐振腔 R 内,谐振频率与氢原子在两子能级间的跃迁频率一致.但谐振腔的交变磁场不是由外加微波源激发的,而是由氢原子的受激辐射激发的.在开始时,处于上能级的氢原子中有少数产生自发辐射,其频率为原子共振频率,即为1 420 405 751.768Hz.这一自发辐射激发了谐振腔的电

磁振荡,该振荡又使泡内大量未发生跃迁的氢原子作受激跃迁,其放出的受激辐射又使谐振腔内场功率增大.当腔内因辐射而增大的功率正好等于腔内损耗的功率时,就形成了稳定振荡.其频率就是氢原子的跃迁频率,而维持这一振荡的能量是由于泡内有不断处于高能级的氢原子的输入.给谐振腔外加一恒定磁场 C ,其作用是保证氢原子能以磁场方向为轴作拉摩进动,使原子在两个特定的能级间发生跃迁.由于原子在腔内与磁场作用的时间特别长,因此由此引起的频率的不确定量更小,其 Q 值为 10^9 ,比铯原子钟还高一个量级.短期的稳定度更高,数小时内可达 10^{15} .然而,由于原子在泡内与器壁作多次碰撞使产生的频率不够稳定,因此氢原子钟的精确度只能达到 10^{11} 量级,且在几小时以后稳定度还会下降,几天之后将不如铯钟.因此它不能用作一次频标使用,一般多应用于在几小时之内精确定时的系统.

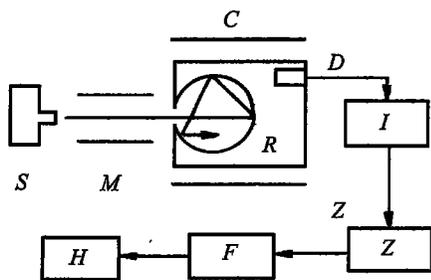


图 4

氢原子钟的频率输出部分是由探测器 D , 伺服电路 I , 振荡电路 Z , 分频器 F 和显示器 H 组成.用探测器从微波腔内探测到的辐射振荡信号作为基准频率信号.将该信号输入伺服电路与石英振荡器产生的振荡信号进行比较,来控制石英振荡器的振荡频率.石英振荡器输出的稳定频率信号经过分频器分频变成实用的低频计时信号,最后由显示器记录,给出实际的时间信息.

目前,已投入使用的原子钟除了铯原子钟和氢原子钟之外,还有铷原子钟.铷原子钟也是利用铷原子 (^{87}Rb) 基态两个超精细结构能级间产生的振荡,其频率约为 6.835GHz .其选态和检测方式与铯钟不同.既不采用原子束,也不用磁性选态.而是采用原子气体容器,并用原子抽运方式选态.铷钟的 Q 值约为 10^7 ,比铯钟低一个量级.其精确度约为 10^{-11} ,短期稳定性较好,时间较长则稳定性下降.然而,由于铷钟具有价格低、体积小、寿命长的优点,其商业前景比较好.

原子钟的产生和发展,不仅是人类对物质世界向纵深认识的必然产物,也是人类实践活动向高速以及向微观和宏观不断扩展的需要.现今世界已采用原子时作为时间标准,各种实用的原子钟已成为提供、记录标准时间必不可少的工具.80年代以来,我国已成为世界八大先进的授时国之一,我国采用的原子钟精度为 3×10^{-13} ,属于国际先进行列.陕西天文台为国内标准的授时中心,由它发出的长波及短波电磁波,不仅为电台、电视台提供标准时间及频率,而且也为我国运载火箭、核潜艇、远程战略武器的发射、入轨、落区测控等提供高精度的时间频率信号,为侦察卫星、通讯卫星等发射的姿态控制、星载仪器的开关、动力装置的点火和关闭等提供准确的标准时间.

人们对原子钟的研究还在继续深入.近年来,已提出了一些进一步提高原子钟精确度和稳定度的方法,并取得了一些研究成果.例如,用激光代替微波激励原子的光学频标;用电磁方法将极低温度的离子(原子)约束在很小区域,再用微波或激光作共振激发的离子阱原子频标;用激光冷却原子的铯原子喷泉频标等都正处于研究之中.在21世纪,随着原子钟技术的不断完善和发展,必将大力推动精密测量和控制技术、空间技术以及高速信息技术的飞速发展,对人类的生活产生巨大而深远的影响.