



Pīnlǚjīshí jiànJiliàng

• 频率及时间 计量

• 周 渭 朱根富编著
• 陕西科学技术出版社



频率及时间计量

周渭 朱根富 编著

陕西科学技术出版社

内 容 简 介

本书系统地、详细地介绍了作为时间、频率标准所使用的各种标准器的原理,以及各种频率标准器之间相互比对、测量的方法和所使用的各种测量设备。书中引用了大量的频率标准器、测频仪器以及测量方法方面的实例,便于读者更直观地了解有关的时间、频率计量问题。

本书适用于从事时频计量的专业技术人员,也可以作为无线电技术方面的科技人员和有关专业的理工院校师生参考。

频 率 及 时 间 计 量

周 渭 朱根富 编著

陕西科学技术出版社出版

(西安北大街131号)

陕西省新华书店发行 西北电讯工程学院印刷厂印刷

787×1092 毫米 32 开本 12.375 印张 262千字

1986年9月第1版 1986年9月第1次印刷

印数: 1—4,160

统一书号: 15202·127 定价: 2.40元

前 言

时间是三大基本物理量之一。目前,时间和频率的标准及其计量的精度在所有物理量中是最高的。它广泛用于导航、空间技术、通讯、工业生产、科学研究及天文学与计量学中。深入了解时间频率计量的标准和方法不仅使我们对时间频率本身,而且对我们掌握其它物理量及其测量都是有益的。尤其在科学技术的各个学科、分支互相渗透、互相影响的情况下,深入了解和掌握时间及频率,对科学技术其它领域的工作会带来许多有益的帮助。

由于至今国内关于时频计量方面的系统性书籍很少。为了满足计量部门、有关院校及广大科技人员在这方面的需要,我们参阅了国内外有关资料,并在我们长期从事这方面计量测试与科研工作的基础上编写了这本书。

本书除了对时频计量进行原理的叙述外,还引用了大量频率标准器、测频仪器以及测量方法方面的实例,便于读者直观地了解有关时间频率计量问题。并根据各有关领域的实际需要,在叙述时间和频率标准,比对方法和比对设备时,侧重于频率,而对时间描述较少一些。书中还广泛介绍了一般的测频方法和设备,以及与时频计量有关的其他知识。书中不少部分是近几年计量测试科研成果的反映。

本书承蒙中国计量测试学会电子专业委员会副主任、上海计量技术研究所副所长戈锦初同志审阅，在此表示感谢。

鉴于我们水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

目 录

第一章	概述及时间单位制	(1)
一、	概述.....	(1)
二、	时间单位制.....	(3)
第二章	比对及测量频率的一般仪器和方法	(10)
一、	一些常用的频率测量方法.....	(11)
二、	数字式频率计.....	(30)
三、	数字式频率计在频率测量中的各种使用 方法.....	(52)
第三章	常用计时仪器及其检测	(74)
一、	概述.....	(74)
二、	机械式秒表.....	(76)
三、	电子秒表.....	(83)
四、	电秒表.....	(86)
五、	航海天文钟.....	(94)
六、	电子毫秒仪	(101)
七、	十进频率仪	(108)
第四章	时间频率标准器及应用	(117)
一、	概述	(117)
二、	石英晶体振荡器	(118)
三、	原子频标	(136)

四、铯束型原子频标	(146)
五、氢脉泽原子频标	(156)
六、铷气泡原子频标	(166)
七、频率标准新的概述和原理	(175)
第五章 频率标准的测量方法	(183)
一、示波器法	(183)
二、频率误差倍增法	(187)
三、差拍法	(199)
四、频差倍增——多周期法	(207)
五、时差法	(215)
六、相位比较法	(220)
七、计算计数器测频法	(236)
第六章 频率标准的准确度校准	(246)
一、直接用标准频率源校准被校频率源	(247)
二、接收短波或甚低频标频信号进行频率 校准	(249)
三、利用彩色电视副载波信号校频	(254)
第七章 频标系统误差的含义与测定	(276)
一、概述	(276)
二、老化率的表征与测定	(277)
三、日频率波动的含义与测定	(290)
四、其它指标的测定	(294)
第八章 频率稳定度指标及其测量	(299)
一、频率稳定度的基本概念	(299)
二、频率稳定度的时畴表征	(302)
三、频率稳定度的频畴表征	(313)

四、频率源的幂律谱噪声模型	(318)
五、有限测量次数引入的误差	(322)
六、有间隙取样引入的误差	(325)
七、频率稳定度的测定与比对	(331)
八、频率稳定度的测定方法	(335)
九、测定频率稳定度的必要条件	(343)
十、几个应注意的问题	(345)
十一、频标的频域测量	(348)
十二、频率时域测量装置指标的测定	(364)
主要参考文献	(387)

第一章

概述及时间单位制

一、概 述

时间和频率在我们的工作和生活中已经是很熟悉的概念了，对时间的计量是一门历史相当悠久的学科。任何一种物质都是在一定的时间和空间里完成其变化、运动和发展过程的。我们的一切活动都或者是粗糙地或者是精密地与时间的计量发生着关系。人们要按一定的作息时间表进行工作和生活；列车只有按照规定的时刻表运行才不会造成运输上的混乱；在赛跑中，十分之一甚至百分之一秒的差距就可以决定胜负；在导航技术中，无论是天文导航还是无线电导航都需要高精度的时间标准，例如，无线电导航是利用电磁波以恒定速度传播的原理来进行定位的。电磁波的传播速度是 3×10^8 米/秒，因此，时间上百万分之一秒（即 1 微秒）的误差将导致 300 米的定位误差。现在的卫星导航系统中所使用的时间标准的精度就更高了。要研究许多和原子及原子核的构造、放射性及宇宙射线有关的问题，就必须准确地测量从百万分之一秒到百亿分之一秒，甚至更短的时间间隔。现在，时间计量已经广泛地用于现代科学技术的各个方面，并且用于对许多其它物理量的间接测量之中。人类经过长期的社会实践越来越认识到准确地掌握时间的意义。在与大自然的斗

争中逐渐发展了这方面的知识，建立起了为人类所应用的各种时间标准，生产出了用于这个方面的越来越多的高精度测量仪器。在最近的六个世纪里计时准确度几乎提高了10个数量级，而在本世纪七十年代中又提高了6个数量级。

通常所说的时间有两个含义，一个是指时刻，它与一定的时间参考点发生联系；另一个是指时间间隔，它不与参考点联系。在绝大多数工程应用中使用的是时间间隔量。

频率是和时间密切相关的物理量，它们是描述周期性运动现象的两个不同的侧面，在数学上互为倒数关系。表现为周期现象的频率 f ，就是单位时间内（即每秒）这种现象变化的周数。即

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-1)$$

其中， T 表示周期，频率的单位是赫兹 (Hz)。

所以时间和频率往往共用一个基准。只是在具体应用中，有些情况下用时间表达比较方便，而在另一些情况下对有些事物用频率表达则更好。频率标准及其精确计量的应用除了有与上述时间计量相类似的用途外，还有许多其它方面的用途。用于天文观测和地球物理学方面的甚长基线干涉仪，要求使用高精度的原子时间频率标准作为其分立本振源。为了满足这种设备对原子频标的严格要求，往往需要采用稳定度最高 (10^{-15}) 的氢原子频标作为其分立本振源。甚长基线干涉仪还在大地测量、时间测量、广义相对论和引力理论的探索方面具有广泛的应用前景。通信技术与频率标准的关系历来就十分密切，现代通信技术从远距离、多路和数字通信多方面的考虑也一步步地对频率标准提出了更高的要求。在各种通讯设备中都使用了不同精度的频率标准，从普

通的晶体振荡器到复杂的各类原子钟都得到了广泛地使用。

另外，在空间技术方面和对电磁波传播的研究以及波谱学方面，准确的时间频率标准都是必不可少的。

二、时间单位制

在我们解决如何准确地计量时间之前，首先需要准确地划分时间。也就是定义出时间的单位制，确定出秒、分、小时、天、年……等等一些量。

1. 世界时

世界上最先通用的时间单位制是采用地球绕地轴自转作为时间的自然基准，这样确定的时间单位制被称作“世界时”。

“世界时”是通过天文观测来确定出准确的时刻的。

由于地球绕地轴自转使得白天、黑夜周期性的交替轮换，这种轮换一般是比较均匀的。所以，可以把地球绕地轴的自转作为时间的自然基准，并且利用对太阳和恒星的天文观测来决定出准确的时刻。

用天文观测来确定时间都是在夜间利用对恒星的观测进行的。天文观测所使用的是一种特殊的望远镜——光电中星仪。由于地球本身的自转，我们在地面上就可以看到各种星体东升西落的现象。使用光电中星仪可以准确地观测到一系列基本恒星经过子午线的时刻。并且，通过一系列精密计时的钟可以准确地得到这些恒星两次经过子午线之间的时间间隔。这里说的子午线，就是经过当地天文台和地球南、北极的正上空的一条南北方向线。对观测到的数据进行必要的处理并修正各种仪器的误差，就可以求出准确的时刻。利用恒星的天文观测来获得准确的时刻时，应该注意到恒星日比太

阳日短，而人们由于习惯和需要使用的是平均太阳日。恒星日比太阳日短的原因，是因为地球除了每昼夜绕着自己的轴旋转一周外，每年还绕太阳公转一周。所以太阳两次相继地经过子午线之间的时间间隔就延长了3分56秒，相当于每月延长2小时，或每年延长一天。也就是一个恒星日就相应地比一个太阳日短3分56秒。这些数据在天文台中都是要经过一定处理的。

直接观测太阳的视运动所确定的时间称为真太阳时（亦叫视太阳时）。由于地球本身自转又沿着椭圆形轨道绕太阳公转，所以地球在近日点的运动速度大于远日点。根据地球轨道资料与开普勒“等面积”定律，计入地轴与轨道平面黄赤交角的影响，经计算发现真太阳时的均匀性较差。一年之中，其日长最多可相差51秒，为此，引出“平均太阳”的概念。也就是假设一个“平均太阳”以真太阳视运动的平均速度在天球赤道上运转，并规定“平均太阳”每两次经过同一子午线的时间间隔为一平太阳日，它的 $\frac{1}{86400}$ 为一平太阳秒。这样规定出的时间叫平太阳时。0度经线处（即英国格林威治天文台所在处）的平太阳时就是通常所说的世界时—— UT_0 ，又称为格林威治平均时。世界时 UT_0 的获得是在天文台通过观测恒星时并加以修正后得到的。

世界时 UT_0 使用了很长时间，人们在长期使用过程中，尤其是在高精度的计时仪器出现后，发现了地球的自转并不是很均匀的。这是因为：由于潮汐摩擦力的影响，地球自转的速度在逐渐变慢（虽然这种变化是极其微弱的）；地球自转受季节的影响产生不均匀性，上半年慢而下半年快，这种影响使一年内日的长度约有正负千分之一秒的变化；而且地

极本身也是变动的，也引起一定的误差。另外，地球的自转还有偶然不均匀的误差，即漂移现象。这样，地球自转速度的不均匀性就造成了以地球自转作为时间基准的时间单位“日”和“秒”的微小变化。这种微小的变化，在科学技术的许多部门的应用中是不能允许的。所以必须对由天文观测所得到的时间进行进一步地修正，以使得到的时间更准确。

在天文学中，我们把不加任何修正值（由恒星时到平太阳时的修正换算除外）的天文观测所确定的时间称为世界时 UT_0 。在 UT_0 系统中包括上述各种误差，是不够准确的。

已经考虑进去地极的移动并加以修正后的时间制用 UT_1 代表。

$$UT_1 = UT_0 + \Delta\lambda \quad (1-2)$$

其中 $\Delta\lambda$ 是平均地极的修正值。

再考虑到地球自转四季的不均匀性，并对这种不均匀性变化修正后的时间制，由 UT_2 代表。

$$UT_2 = UT_1 + \Delta T_s = UT_0 + \Delta\lambda + \Delta T_s \quad (1-3)$$

这里， ΔT_s 是地球自转四季不均匀性变化的修正值。

但是， UT_2 时间制仍有其缺点，其中还包含有地球自转速率的长期变化和不规则变化的影响。随着年月的不同，用 UT_2 测量时间会有 $\pm 1 \times 10^{-8}$ 的误差，也就是一亿分之一的相对误差。据推算，如果一直沿用世界时，二千年后将产生近两小时的累积误差。

2. 历书时

为了消除地球自转漂移的影响，在世界时之后又出现了一种新的时间制。它是建立在地球绕太阳公转周期的基础上，叫作“历书时”(ET)。历书时是以地球绕太阳运转一

周(一回归年)时间的 365.24219879 分之一为一历书日,而取一历书日的 86400 分之一为一历书秒。天文工作者们经过数百年的观测发现,尽管地球公转速度时快时慢,但它的公转周期却相当稳定。所以,用它所确定的基本时间单位——秒,是一种相当均匀的时间。但是,历书时的确定却是一件非常困难的事情,这需要整理全世界各地的观测值,并且需要得到长期和大量的观测结果后才能将这个时间制建立起来。而且,又由于用于天文观测的各种仪器本身的精度有限,所以历书时的精度也只能达到 10^{-9} 量级。

3. 原子时

原子钟的出现,为我们提供了一种新的精度高而且使用方便的计时系统——原子时(AT)。原子时间基准主要取决于微观粒子的内部构造和运动,具有相当高的稳定度(10^{-15})和准确度(10^{-13}),而且它是一种自然基准,在实用上不需天文观测。在实验室内,用很短的时间就能高精度地复现时间基准,使用十分方便。

由于量子电子学的发展,人们发现了原子内部运动的稳定性比地球自转的稳定性要高得多,可以用它来建立更加均匀的时间标准。原子的内能是不连续的,也就是说原子本身所允许具有的能量数值是一些不连续的量,它们是一档一档分开的,而不是任意的。我们把分隔成一档一档的原子的能量值称为原子的能级,每种物质的原子只有若干种固定的能级。原子能量的变化只能取从一个能级跳到另一个能级的形式,叫作跃迁。原子跃迁时从高能级跳到低能级或从低能级跳到高能级的不同,而会放射或吸收一定波长的电磁波,这电磁波的频率是极为稳定的。利用原子跃迁时放射或吸收

一定波长的电磁波的特性，可以作成频率标准，即原子频率标准。原子频率标准的稳定程度要比天文观测所决定出的时间的稳定程度高得多。原子时规定零磁场中铯 133 原子基态超精细 0-0 跃迁对应的 9192631770 周的间隔为一原子时秒，并规定 1958 年 1 月 0 日 UT_2 零时为原子时刻的起点。

原子时是非常均匀稳定的时间，而世界时则存在不规则变化和长期变慢的趋势，这样，两者将随时间的增长而产生越来越大的差异。仅从 1958 年到 1971 年底这段时间里，世界时的时刻就落后原子时将近 10 秒。于是，产生了这样的矛盾，从极高精度计时和科学研究等应用来说，需要采用均匀稳定的原子时；而从一些与地球自转密切相关的部门的应用以及人们日常生活习惯来说，却要求使用世界时。为此，国际上规定了采用协调时的授时方案。

协调世界时严格按照原子时的秒长计时，只是在时刻上保证与世界时相差不大于 0.90 秒，否则需要在规定的时间跳动一整秒——称为闰秒。由于地球自转速率的变化，尚无法详细预告何时使用闰秒。可见，协调世界时实际上是一种用闰秒的方法来迁就世界时时刻的特殊原子时。

世界时、历书时、原子时是目前三种计时系统，它们之间互有联系，可以精确换算。虽然原子时有很高的精度，但由于使用中的实际需要，它并不能完全取代其它时制。现在，这三种时制都在使用中。

4. 守时

根据世界时，依靠天文观测我们可以知道准确的时刻。但是，用天文方法来决定时刻通常是几天才进行一次，并且对观测到的数据还得进行一系列的修正和处理。而在实际使

用中却需要经常不断地知道准确的时刻。所以就需要把两次天文观测之间的时间间隔准确细致地划分并且“保存”起来，这样，在随时用得着的时候就会知道准确的时刻。这个过程就叫作守时。对于原子时当然也同样存在着守时的问题，只不过原子时的获得和原子时的保持结合地更直接和更紧密罢了。

过去，世界各国的守时工作大多是依靠石英钟来进行的。而现在，由于各种原子钟的性能不断改进，能够长期可靠地连续工作，又较之石英钟有更高的精度，所以在守时工作中逐渐取代了石英钟。

无论是石英晶体振荡器还是原子频率标准，所直接产生的都是高频率的振荡信号。从守时的要求出发，都要经过若干级分频器分频以后，把上述精确的高频振荡信号按一定的比例，变为低频率的毫秒和秒信号。用这个低频率的电压带动同步电机，并通过指针指示器指示出时间，或者直接通过数码管，以数字的形式显示出时间来。

世界时的守时常是根据天文观测，来校正石英钟指示的瞬时时刻，以及校正石英晶振的频率。由于石英钟具有相当高的稳定度，所以一经校准即可准确运行，随时指示出准确的时刻。为了保证守时的可靠性，守时往往是由若干个石英钟组成一个钟组来进行的。

原子时(包括协调时)是由原子钟组成和保持的。同样，由于受原子钟使用寿命、稳定度、准确度和复制性各因素的限制，实际上也往往是用多台原子钟来构成原子时。常常是用作为基准使用的大铯钟或氢原子钟，逐日校准一组作为工作钟使用的铷原子钟来构成原子时及其守时系统。也有用多

台小铯钟组成钟组来构成原子时系统的。原子钟的精度决定着它所给出的原子时的精度。目前，一些用于原子时方面的原子钟所能够达到的指标是：作为基准使用的大铯钟、氢原子钟的准确度往往优于 1×10^{-12} ，复现性优于 5×10^{-13} ，守时用的铷原子钟稳定度和漂移率分别是 1×10^{-12} /天和 1×10^{-11} /日，并且能够连续工作数年；连续运转的小铯钟，其准确度为 1×10^{-11} ，漂移率为 1×10^{-12} /年，复现性为 5×10^{-12} 。