

國外時間與頻率測量技術

上海市標準計量局 編

2
上海科學技術文獻出版社

国外时间与频率测量技术
上海市标准计量局 编

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海高安路六弄一号)

新华书店上海发行所发行
浙江洛舍印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 8.5 字数 179,000

1980年7月第1版 1980年7月第1次印刷

印数: 1—3,300

书号: 15192·93 定价: 1.07 元

《科技新书目》164-112

前 言

本书以美国国家标准局 1974 年出版的专题论文集《时间与频率：理论和基础》(《NBS MONOGRAPH 140 TIME AND FREQUENCY: Theory and Fundamental》)为蓝本编译的,其中删去第 3 章、第 7 章、第 8 章、第 11 章及其它一些部分,并适当补充一些新发表的有关文章。

全书从时间与频率的基本理论到当代技术水平以及今后的发展趋势,进行比较系统和全面的论述。本书的重点放在原子频率标准的试制和测量技术方面。内容包括时间与频率的基本概念、石英晶体与石英晶体振荡器、原子时间与频率标准、时间与频率标准的传播等。

读者对象:从事天文学、计量学、无线电电子学、量子电子学、通讯、导航、宇航等方面工作的科技人员、工程技术人员、大专院校师生等。

编 译 者

目 录

1. 精密时间与频率的基本概念	1
2. 原子时间尺度的准确度	12
3. 石英晶体单元与石英晶体振荡器的技术水平	21
4. 一种新型晶体——FC切型晶体的研究与进展	36
5. 精密石英谐振器的未来发展	40
6. 热瞬变补偿晶体(TTC)切型的深入研究结果	46
7. 原子频率标准的最新进展	53
8. 美国国家标准局原子铯束频率标准的改进	60
9. 新的铯束频率基准 NBS-5	65
10. NBS-4 和 NBS-6: 美国国家标准局的频率基准	69
11. 新一代 SAO 氢脉泽	81
12. 未来频率基准的发展前途	95
13. 新设计的被动型氢原子频率标准	105
14. 美国宇航局氢原子频标规划	112
15. 电视时间频率传送技术	116
16. 空间技术在时间频率的传播及同步方面的应用	127

精密时间与频率的基本概念

James A. Barnes

本章将阐述守时原理, 提出时间与频率(如日期、时间间隔、同时、同步)的基本概念。详细讨论天文时间尺度, 原子时间尺度以及二者的协调时间尺度。世界时间尺度是以空中太阳的视在运动为基础的, 而原子时间尺度则是以与某些原子谐振时的无线电信号的周期振动为基础的。本文还介绍 1972 年 1 月 1 日以前和以后协调世界时的时间尺度, 阐明采用国际原子时间尺度的必要性。

绪 论

时间计量是一门历史悠久的学科。不了解它的历史就很难认识今日时间与频率的计量工作。本文简单介绍科学与工程中应用时间与频率的历史。先讨论钟的出现和时间计量概念, 再叙述时间尺度, 包括天文时、原子时和协调时间尺度。世界时间尺度是以天空中太阳的视在运动为基础的, 而原子时间尺度是以与某些原子谐振时的无线电信号的周期振动为基础的。本文还介绍自 1972 年 1 月 1 日开始使用的协调世界时制。从国际原子时间尺度(TAI)*的特点和科学发展的需要, 阐明国际时间局(BIH)采用原子时间尺度的必然性。然而, 国际原子时间尺度在某些方面还不能代替天文时间尺度, 例如测定地球位置还需天文时间尺度。

钟 与 守 时

早先, 空中太阳的位置是唯一可靠的计时标准, 看不到太阳, 就无法知道精密的时间。人们曾发明几种计时装置(称为钟)。以太阳为主钟, 它借助于日规读出时间, 用来插值日射之间的分度。各式各样的时钟装置构成了有趣的钟发展史。本章不准备一一赘述。这里仅给出各历史阶段钟的准确度的提高情况(图 1)。(在后六个世纪里计时准确度几乎提高 10 个数量级, 本世纪七十年代中又提高 6 个数量级)。钟可以是象空中太阳位置那样的基准钟, 也可以是插值基准钟或时间标准的分度的二级钟。历史上, 某些人曾用钟这个字代表二级时间标准的涵义, 但是现在这种用法是太狭义

人们一提到钟, 很自然会想到各种类型的物理原理, 钟面以及许多齿轮。钟摆每摆动一次, 指针移动一步。事实上, 钟的齿轮和指针计算钟摆的摆动次数, 而钟面标识出时、分、秒。

摆钟最显著的缺点是没有两台摆钟能永远保持准确相同的时间。它促使人们寻找钟的

* 秒咨询委员会第六次会议(1972 年 7 月)推荐在世界各国的语言中均以 TAI 代表国际原子时。

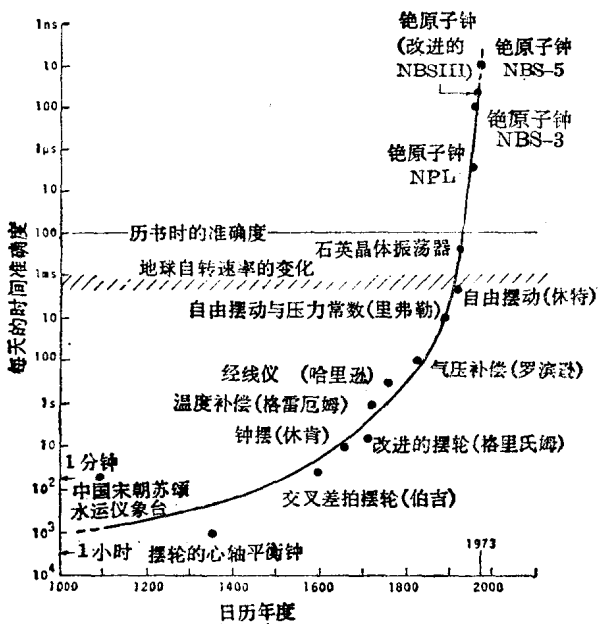


图 1 守时准确度的进展

- 注: 1) 主要数据由瓦特、马里逊和弗拉色供给。
 2) 目的是要表明进展的水平, 各种钟显示出准确度不断提高。
 3) 公元 1000 年前, 使用机械式水钟, 日规, 烛光计时等等, 准确度很低。

人们熟知原子具有谐振特性, 这种特性可视为“特征振动”。所以完全有可能采用原子谐振作为“钟摆”。原子谐振的研究通常局限于微波及光谱领域。目前, 原子微波谐振是人们至今所发现的可以最精密测定又能复现的物理现象。已有充分证据表明以振荡原子作“摆”的钟, 其时间尺度比天文时更均匀。

但是在任何实际系统中总存在着内在误差, 人们还得承认现有的钟与其他类似钟产生漂移的事实。当然, 原子钟的漂移率比老式摆钟小, 不管怎样漂移确实存在, 而且不可忽视。人们希望尽可能使原子时在世界范围内能被接受, 实现这一目标的唯一方法是对各实验室发出的原子时进行协调。目前, 已进行了全国和 international 的协调。

时间的基本概念

在时刻的含义中人们可以应用“时间”这个词(所谓时刻就是在时间标尺上的一个特定的记号或点), 人们也可以使用时间间隔或两个事件之间的时间“长度”这个概念。时刻与“时间间隔”这两个概念之间的差别很重要, 它们经常会被“时间”这个词弄混淆。本节将探讨各种时间涵义中所固有的基本概念。

地球时间尺度上的事件时刻, 是根据从某个协定起点算起的视太阳运动周期数(和一周的若干分之一)获得的。原子时间尺度是通过与某种原子谐振的信号周期的计数获得的。有几种原子时间尺度选取第二世界时(UT2)1958年1月1日零时为“零点”, 但它不在现在的全部原子时间尺度之间通用。这两种尺度的主要区别在于, 原子钟的周期远远小于视

更稳定的“摆”。过去, 天文学中发现了最稳定的“摆”。因为只有一个宇宙存在, 所以至少在观测上给人们带来了极大的方便。原则上, 用这种方法定义的时间适用任何地方。这样, 人们可以获得在世界范围内可接受的很可靠的时间尺度。本文中, 时间尺度被看作为确定事件间的概念清楚的一种手段。

从确切意义上来讲, 今日的普通电钟的“钟摆”就是电力公司提供的电流。美国的发电厂通常把发电机频率与美国国家标准局的低频广播 WWVB 同步, 所以每天都获得正确的“摆动次数”。因为由同样电源供电的电钟, 实际上有相同的摆, 因而彼此无快慢, 即它们以相同速度运转。的确, 它们总是与 WWVB 广播时间保持一致(± 5 秒), 并且在长时间间隔内彼此保持相同的时差(± 1 毫秒)。

太阳运动的日周期。所以原子钟需要比计算太阳日更复杂的仪器来计算周期。二者的差别主要是技术上的难易,并非有更深道理。原子钟容易读数,比地球钟精确几千倍,这在技术上是重要的。另外,原子钟的读出准确度估计比地球钟高 10 万倍。

在美国有关导航卫星跟踪和大地测量文献里有时“时期”(epoch)这个词与“时刻”的意义相类似。但是字典上,“时期”的定义含有持续时间,瞬时时间,特别时间参考点以及地质周期等意义。“时期”常常兼有“时刻”与“持续时间”这二者的涵义。由于“时期”这个词有如此模棱两可的含义,现在多使用“时刻”,而不大用“时期”。时刻含义准确,既无模棱两可,又不与其他习惯用法相抵触。例如,一个事件的时刻可以是协调世界时(UTC)1970年6月30日14时35分37.278954秒。另一方面,“时刻”决不能与“时期”或“时间”互换使用。

时间的另一个概念是“同时性”。即两个事件的时间一致性。例如,我们可以将一些钟与实验室的便携钟同步。这里引入另一词汇:“同步”,同步是指两台钟在同一参考系统里读数完全一致,而不是指钟与标准时间尺度同步。譬如,两个人想通讯,他们对“时刻”是无所谓的,只希望在使用通讯工具时要同步。许多复杂的电子导航系统(和避碰报警系统)与“时刻”准确度无关,却要求很高的时间同步准确度。甚至连普通的电视接收机也要求准确的时间同步。于是,我们看到了时间概念的复杂性,以及各种概念应用到有关活动中,并影响着这些活动。

时 间 尺 度

确定事件时刻的制式称为时间尺度。空中太阳视在运动是人们最熟悉的时间尺度之一,但是它不是唯一的时间尺度。如果要用太阳视在运动作时间尺度来完满地规定一个时刻,首先必须从商定的某个起点开始计算时期(即编一本日历)。另外,根据准确度要求,还要测出以时、分、秒甚至是几分之一秒为单位的“日”的分数。这就是说,人们要计算太阳围绕地球的视在运动的周期数(以及一“周”的分数)。

目前有天文时间尺度与原子时间尺度,为精确同步化奠定了基础。“时间”这个词的广泛含义概括了时间尺度、时间测量、甚至时间间隔各个方面。它完全与字典上的定义相一致。确切地讲,同步的研究一般属于时间扩大的研究。目前,世界上存在着各种时间——天文时、生物时、原子时等等。所以认为用天文方法测定时间是唯一的计时方法这种说法,不仅使人误入歧途而且也是错误的。

由空中太阳视在位置得到的时间称为“视太阳时”。由日规所直接读到周的分数。用日历如伽里略历来帮助计算日期,并给日期命名。

哥白尼指出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,经计算发现视太阳时并非均匀一致。图 2 表示太阳—地球—月球之间的关系。

世 界 时 (UTO)

计算这些轨道及倾斜效应并修正视太阳时以得到较均匀的时间,通常称为平太阳时。这种从视太阳时到平太阳时的修正值称为时差。现在,在许多日规上仍能看到时差的记号。

假如人们考虑用一颗运动的恒星代替太阳测出一日的长度,那么地球的椭圆轨道就显

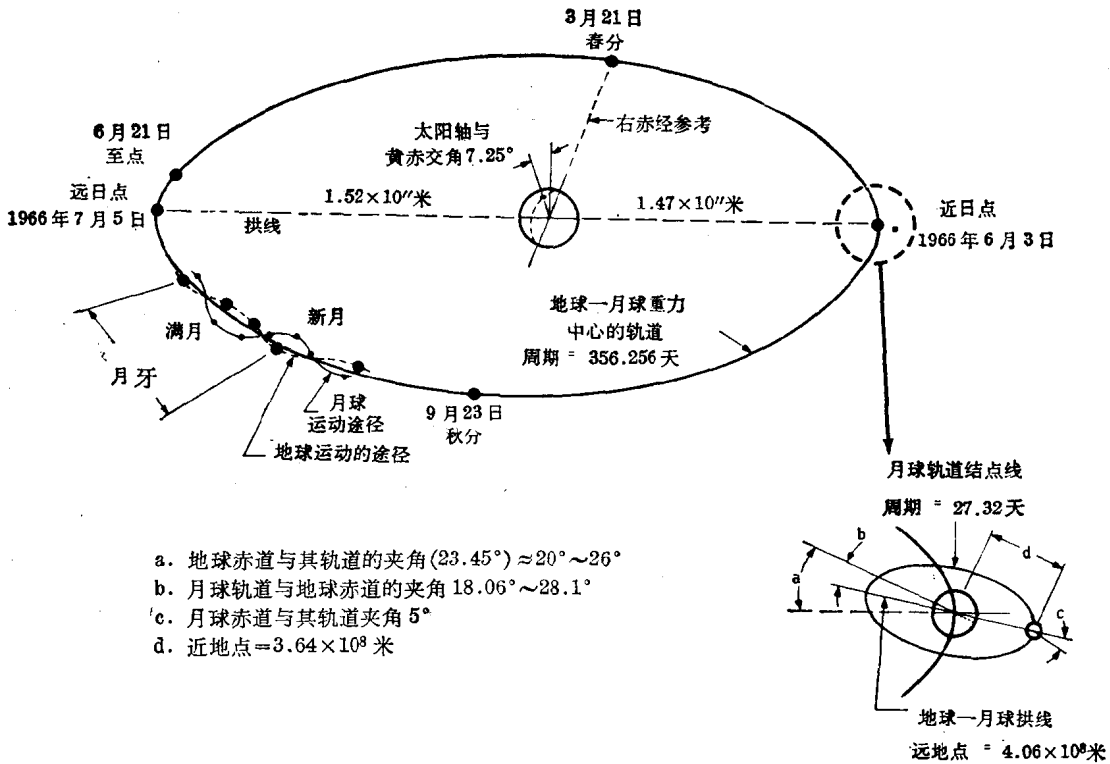


图2 太阳—地球—月球之间关系

得不重要而可以忽略不计。这种时间称为天文学家的恒星时，通常与平太阳时相等。因为这两种时间都是以地球自转为基础的，所以恒星时的秒具有足够的差值使恒星年比太阳年有更大的“日”。在实践中，天文学家通常观测恒星时，并对它修正得到平太阳时。世界时(UTO)相当于在格林威治子午线上测得的平太阳时，又称为格林威治平均时(GMT)。

时间是在导航中确定经度必不可少的依据。实际上，导航员用六分仪测出某颗恒星与导航员天顶间的夹角(图3)。显然，对一颗指定的恒星有一条具有一定夹角的运动轨迹。观测另一颗恒星又会得到一条不同的轨迹，两条轨迹的交点之一即是导航员的位置(观察第三颗行星还能进一步确认其正确性)。显然，交点位置只取决于地球的转动位置，天体导航基本上依赖于地球的位置，

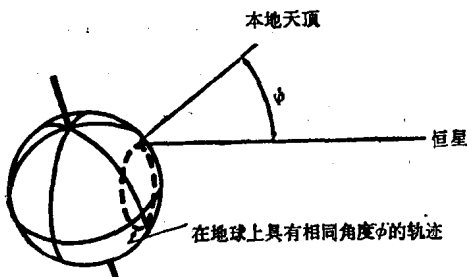


图3 天体导航的原理

而地球也规定了一个时间尺度，所以归根结底天体导航离不开时间。

第一世界时(UT1)

导航员为了应用恒星导航，必须要有测定地球位置的方法，把六分仪和钟结合起来使用导航员就可以测定他们所在的位置。随着导航事业的发展，对时间和高精密钟的要求越来越高，研制出了性能优良的导航钟，但是发现在不同方位测得的世界时有偏差。这种偏差来自地轴的摆动。图4画出从1964年到1969年地极与地球表面相交的位置。从图4可知，

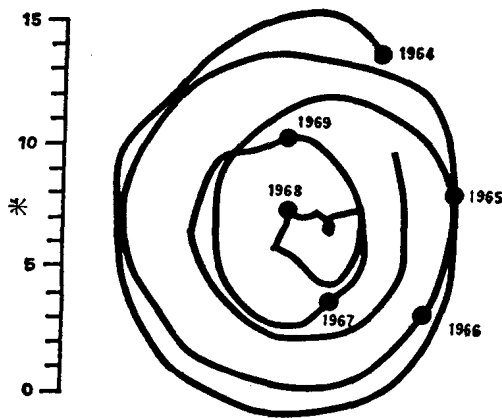


图4 1964年~1969年地极的移动路径

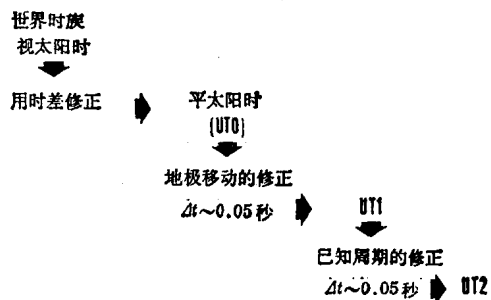


图5 世界时族的相互关系

地极移动了15米左右。通过将世界各个天文台进行的天文测量结果相比较,就能修正这种效应,并得到均匀性较高的世界时 UT1。

第二世界时(UT2)

几年前发现,随着摆钟和石英钟的改进,第一世界时(UT1)具有半年周期和一年周期的周期波动(引起原因不明)。用自然响应来消除这些波动,得到更均匀的时间——第二世界时 UT2。这样就出现了以地球自转为依据的完整的世界时族,以及各种修正值(见图5)。从时间发展史可知 UT1 与地球角位移有关,它是导航员们使用的真实时标。UT2 是修正过较均匀的时标,它反映不出地球角位移的真实周期变化。

历书时 (ET)

谈到历书时,还须追溯到上世纪末本世纪初和其他天文学方面的研究工作。在十九世纪后期,西蒙·纽康(Siman Newcombe)根据牛顿力学编制了一组历表,对太阳、月球与其他行星将来的位置作了预测。这种表称为历书。但是后来发现,预测位置同观测结果有明显的偏差。这种偏差甚至无法用观测误差或近似理论来解释。不过,如果认为时间因某种原因而有误差并加以修正的话,所有的表就相符了。根据这点认识,推知地球的自转速率是不均匀的。后来由石英钟、原子钟进一步证实了这一点。为此,天文学家实际上所采取的办法是反过来用关于太阳的纽康表定时间,即称为历书时。历书时是以地球公转(不是地球自转)为依据的时间,它不会受地壳移动及地球形状的其它变化的影响。

布劳沃(Brouwer)等人对世界时(UT)时间尺度的变化即地球自转速率的变化进行了广泛研究。本节只就一般特点和长期观测到的变化大小作一简介。图6曲线概括了布劳沃的数

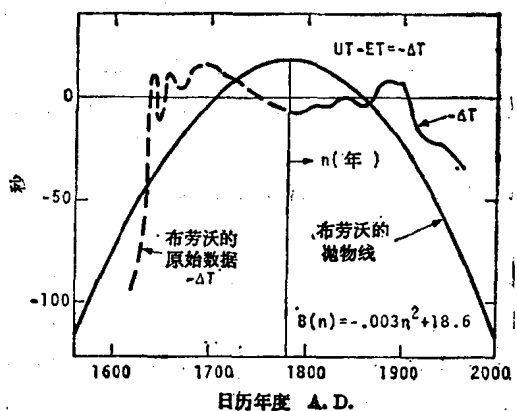


图6 世界时——历书时在三个世纪中变化趋向
(数据来自布劳沃的著作)

据和分析结果。图中反映出世界时(UT)因突然出现的不稳定变化引起的随机性能,这种突然的不稳定变化1963年曾出现过。图中横坐标与历书时(ET)成比例。目前,历书时ET的均匀性比得上原子时 ΔT ,仍不失为检验时间尺度长期特性的优良时间比较尺度。值得注意的是布劳沃提出,地球自转的随机过程使世界时均方根值波动,对于 t 大于一年以 $t^{3/2}$ 增加。在一年或小于一年周期之内第二世界时的时间尺度变化使均方根值波动以 t 的一次幂增加(闪烁噪声频率调制)。线性项系数约 2×10^{-9} ,几乎比铯钟差 10^5 倍。现有测定历书时(ET)的方法尚不够精密,因此还不能对历书时可能有的系统变化作定论。

原子时(AT)

如前所述,事件的世界时间尺度的时刻是从商定一致的起点计数的视太阳周数(或周的分)来获得的[视精密度要求,也可以应用修正值以获得世界时(UTO),第一世界时(UT1)或第二世界时(UT2)]。同样,原子时间尺度是通过计算与某种原子谐振的无线电信号的周期次数而获得的。

四十年代后期,美国国家标准局的哈罗德·莱昂斯(Harold Lyons)宣布第一只原子钟诞生。

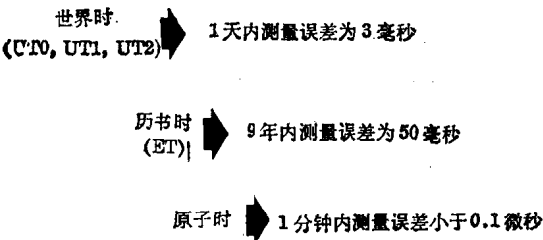


图7 具有代表性准确度的各种时间尺度

五十年代,已有几个实验室着手原子时间尺度的工作。目前,国际时间局保持原子时间已经有几年了。1971年10月计量大会(CGPM)正式承认原子时为国际原子时(TAI)。1972年1月1日开始,多数国家用原子时间尺度授时(见第4.7章“新的协调世界时系统”)。综上所述,现在有三大类时间尺度(图7):以地球自转为依据的世界时族,以地球绕太阳公转为依据的历书时和以原子的基本特性为依据的原子时。其中原子时是非常均匀又非常精密的。而历书时,由于地球绕太阳公转的速度非常慢,每年只转一圈(即一周),故历书时的测量不确定度限制了实现准确的历书时,误差九年平均值约0.05秒。而世界时(UT)误差每天千分之几秒,原子时为每分钟十亿分之几秒或更小。

1972年前的协调世界时(UTC)

1960年至1971年许多授时信号(例如MSF, WWV, CHV)仍以协调世界时(UTC)为依据。协调世界时的时钟日差受到原子钟控制,做到一年内尽可能均匀一致。但是,这种时钟日差在第一个日历年就有变化,因此由国际时间局选取年差。表1中列出协调世界时(UTC)时间尺度对纯原子时间尺度的年差相对偏离值。表中负值说明世界时运行速度较原子时慢。选取适当时钟日差补偿可以使协调世界时(UTC)和第二世界时(DT2)相一致。然而,人们尚不能预知地球自转速率和非一致性可能发生的变化。根据国际协定,协

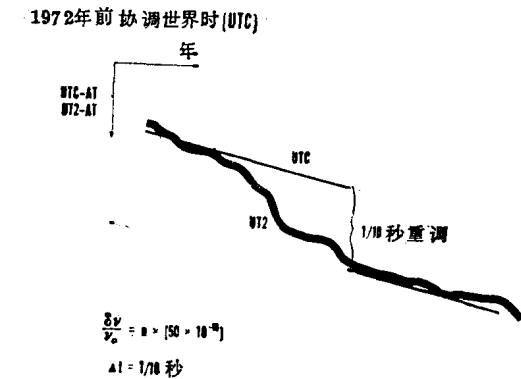


图8 1972年前的UTC和UT2时间尺度的关系

表 1 1960~1972 年 UTC 的频率偏离值

年	UTC 的频率偏离速率 1×10^{-10}	年	UTC 的频率偏离速率 1×10^{-10}
1960	-150	1967	-300
1961	-150	1968	-300
1962	-130	1969	-300
1963	-130	1970	-300
1964	-150	1971	-300
1965	-150	1972→将来	0
1966	-300		

调世界时 (UTC) 和第二世界时 (UT2) 的一致性不应该超过 0.1 秒 (1963 年前规定为 0.05 秒)。为使误差限定在图 8 规定的允差内, 必要时, 需重调协调世界时钟 0.1 秒 (1963 年前是 0.05 秒)。国际协议还将时钟日差修正值限定为 5×10^{-9} 整数倍 (1963 年为 1×10^{-9})。此外, 有些授时站 (例如 WWVB) 发布同步原子时 (SAT) 信号, 它由无时钟日差修正的原子钟发出, 但是需要对该信号作周期性重调 [通常比协调世界时 (UTC) 调得更多], 使同步原子时与第二世界时 (UT2) 偏差在 ± 0.1 秒以内。

新协调世界时制

由于协调世界时 (UTC) 的时钟日差与准确的原子时日差有偏离 (表 1), 而且偏离值随时在变化, 迫使仪器设备随着钟的偏离而变化, 并常常使复杂的系统中断。随着对可靠的同步化的要求的日益增长, 旧的协调世界时 (UTC) 制已显得很不适用。需要寻求新的协调制, 以满足精密时间同步的需要。

1971 年 2 月, 日内瓦国际无线电咨询委员会 (CIR) 决定采用新的协调世界时制, 并于 1972 年 1 月开始生效 (见附录 1·B)。在新时制中, 各台钟都以修正的时钟日差 (零偏离) 运转。这样, 时钟就不能与“日”的长度准确一致, 带来时钟日差。

上述情况正因为“年”的长度不是“天”的长度的整数倍, 因而出现闰年。在这种情况下, 能用 4 除尽的年份有额外的一天——2 月份有 29 天——这就是闰年。开始一个世纪时, 虽然能用 100 除尽, 但不能用 400 除尽的年就不是闰年。如 1968 年, 1972 年, 1976 年, 2000 年都是闰年。2100 年不是闰年。有了闰年, 我们的年历才与大自然季节相符合。

例如, 为使时钟与太阳近似同步, 需要作 ± 1 秒——闰秒的调整。这时一分钟可能为 61 秒或 59 秒, 而不是平时的 60 秒。闰秒, 一年不能超过一次。根据国际协议, 协调世界时 (UTC) 与导航时标第一世界时 (UT1) 的偏离不应超过 0.7 秒。闰秒的引进, 使良好的时钟与太阳保持近似同步。由于地球自转速率的变化, 尚无法详细预告何时使用闰秒。

时间尺度的比较

可根据以下四个重要特点来比较时间尺度:

1. 准确度与精密度;
2. 可靠性;
3. 通用性;
4. 延续性。

钟近似误差
(非均匀)

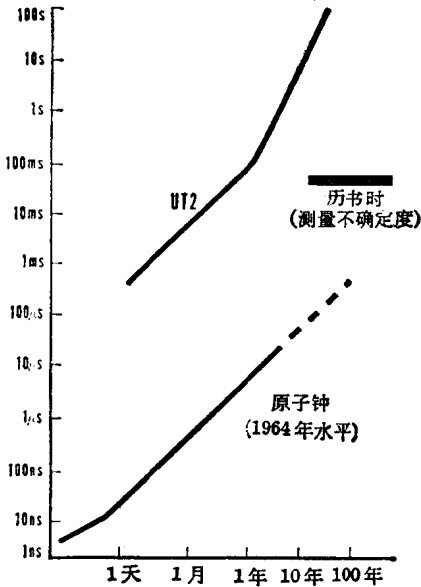


图9 三种钟在同步后的近似误差

不确定度使人们无法了解其统计波动。

可靠性与多机复用

过去,原子频率标准的可靠性运行曾是一个突出的问题。但现在,“故障之间平均时间”(MTBF)超过一年的商品原子钟也不少见。可是,原子钟源寿命有限,它不能无限期地工作。

故障间平均时间(MTBF)超过一年的事实反映了技术上的进步,但是仍远远比不上可靠性很高的天文时。最好的解决办法就是采用多机原子钟系统,即在系统中使用几台原子钟,此方法肯定会提高准确度和可靠性,但是代价昂贵。

如果钟系统的综合器—计数器配套设备有微小跳变,引起显时中断,说明外表无明显故障的仪器有可能瞬时失灵。此时,如果只有两台钟比对,很显然,就不可能判断哪台钟有瞬时故障。为保证运行可靠,一个系统至少用三台钟(没有必要都用原子钟)。如果有一、二台钟处于停工阶段(譬如在补充原子源时),还需同时使用四至五台钟。

由上述所知,为提高原子时可靠性,应该把许多钟联合构成计时系统,由各故障间平均时间(MTBF)计算出系统的故障间平均时间,还可以扩大到地质时间间隔。这类系统因不计入可能的突然事故和操作人员误差,毫无疑问故障间平均时间是相当乐观的。况且,目前世界上已推广使用了各种原子钟,有可能保持一种在可靠性方面能满足任何要求的原子时间尺度。

国际原子时间尺度(TAI)

近年来,国际计量大会(CGPM)决定采纳国际时间尺度(TAI)。这样一种时间尺度需达到下面几个方面:

在准确度和精密度方面,原子时的时间尺度比天文时间尺度明显优越。其可靠性与通用性接近天文钟,而天文时间尺度是建立在一只任何人都能获得“单独”的钟基础上(即都参照一个太阳系)。许多原子钟可能会显示出不一致性,只用一只钟就不会出现。延续过去事件的时间(包括遥远的过去事件),原子钟永远也做不到。虽则如此,未来对它们的需要仍是值得注意的问题。一般科学部门,尤其通讯工业更加需要长时间的准确而精密的计时。天文时已不能满足这些要求。但是,太阳系的连续运动所产生的天文时间尺度的可靠性是原子钟无法达到的。

人们可以想象,让时钟与一个假设的理想时间尺度同步,一段时间后,同步性误差很大。图9代表某些类型钟同步后的可几误差的统计分析结果。从图9得到如下两点结论:第一,1964年水平的原子时已比世界时均匀1万倍。第二,历书时的测量

1. 准确度高,使用比天文时方便。
2. 可靠性高,计时系统无故障(全世界有许多时钟同时运行,相互比对)。
3. 世界各地可很容易地使用原子时间尺度。

国际时间局的原子时间尺度保证上述性能。1971年10月国际计量大会赞同国际时间局原子时间尺度作为国际原子时间尺度。协议规定如下:

国际原子时是由国际时间局建立的协调时间基准,它以遵从国际单位制时间秒定义的不同机构原子钟的读数为基础。

国际时间局维持原子时间尺度所用的稳定参考信号,其中的37.5%由美国国家标准局(NBS)和海军天文台(USNO)保存的原子时间(AT)尺度提供。国际原子时间尺度的时差准确度问题,现在还没有完全确定下来。为了修正国际原子时,还有一个公认的平均的计算方法问题。1972年6月,在法国巴黎召开秒定义咨询委员会特别会议。会议就原子频标的现状,改进国际原子时的实现及有关问题进行了讨论。国际时间局局长盖热特(Guineet)博士推荐了计算国际原子时(TAI)的新方法。他建议将单个的原子钟数据来代替各地实验室当地的原子时间尺度,预期能改进钟数据的权重。上述单个钟数据处理的某些优点如下:

1. 大多数地区时间尺度是建立在少量钟的基础上。TAI的不规则变化是由某些TA(i)频率变化引起的,而在地区时标中,因地区有效使用的标准数不得小于三台,所以这些频率变化看不到。这种情况经常有。特别在全球处理TAI数据时可以发现这些不规则的变化。

2. 可以使用独立的标准。例如在欧洲,至少存在着12台容易得到而且与罗兰C脉冲或电视脉冲比对过的铯钟,它不包括罗兰C台的铯钟。

3. 各个标准的数据处理方法可求得统一,详细说明已人人皆知。由于目前各个参与这项工作的实验室的处理方法尚未全部发表,因此也不可能知道如何计算国际原子时(TAI)。

4. 为建立原子时TA(i),各个实验室完全有自由根据自己的标准进行国际原子时的直接计算,如果没有标准,各个实验室就应该先取国际原子时采用的标准。

美国的协调世界时间尺度与国际时间局(BIH)的协调世界时UTU的一致性在 ± 10 微秒内。国际无线电咨询委员会规定:一切协调世界时间尺度(UTC)与国际时间局的世界时间尺度之差不超过 ± 1 毫秒。要求准确的世界时资料时,要把修正值编码为标准时号发布。虽然出现了国际原子时间尺度,还得承认天文时间尺度有继续存在的必要。例如,进行天体导航的人们就必须知道地球的位置(UTI)。

频率与时间间隔的概念

目前在科学研究领域里使用的四个独立基本参量,是长度、质量、时间与温度。事实上,除了宇宙学、地质学、天文学等科学领域以外,时间间隔是最重要的概念。而(天文)时刻对其它的科学领域重要性不大。这是因为物理学的“基本定律”与大自然界不同,物理学的基本定律只涉及到小的时间间隔,它不取决于所用的日期。

根据物理学基本定律和广泛的实验,科学家确证频率可被控制,并且可以用任何物理数量的最小的百分比误差进行测量。表现为周期现象的频率,就是单位时间内(即每秒)这种现象变化的周数。频率的单位为赫兹。由于绝大多数钟都以周期现象(例如钟摆)来守时,现在人们已能制造可靠的电子计数器来计数周期现象的“摆”数,并制造出计时准确度(时钟日

差准确度)与频率标准准确度相等的钟。

随着时间尺度的进展,秒定义历史可概括以下:1956年前,秒被定义为平太阳日的86,400分之一。从1956年到1967年为历书时,秒定义为1899年12月31日00时00分00秒回归年的315,569,259,747分之一。自1967年以来,按照铯原子的谐振来定义秒。现在的秒定义为:

“秒是相应于铯¹³³原子基态的二个超精细能级间跃迁9,192,631,770个辐射周期所持续的时间”。

今天,最精密、最准确的钟都以铯原子束作钟“摆”。

时间间隔和时间尺度

人们应该注意到,在“秒”这个词的使用以及对时间测量方面存在着概念上的混乱。假定,在不同的时间上出现两个事件,这两个事件分别出现在协调世界时1970年12月15日15时30分00,000,000秒和协调世界时1970年12月15日16时30分00,000,000秒,首先我们会想到这两个事件之间的时间间隔恰好为1小时=36000000秒,实则不然,真正的时间间隔则长0.000108秒 $[3600 \times 3600 \times 10^{-10}]$ [见表1]。值得回顾一下,协调世界时间尺度(象所有世界时间尺度和历书时的尺度)不是按照时间间隔来定义秒的,因此,为了要获得这两个事件之间精密的时间间隔,不能简单地将按协调世界时间尺度(或任何世界时间尺度、或历书时间尺度)规定的两个事件的时刻相减。从历史上来说,其原因是,导航员需要知道的是地球位置(即第一世界时),而不是秒的持续时间。现在科学家需要知道既准确又能复现的时间间隔。假如特定的时间间隔包括一个或几个闰秒,则应注意:它可成为真正的UTC系统。

由时间尺度(UT)、历书时间尺度(ET)、协调世界时(UTC)所指定的日期包括了与时间间隔单位秒这个相同的词,所以也是很混乱的。为了进行准确和精密的测量,这种区别十分重要。

时间尺度的应用

时间尺度的研究可分为对系统同步用的时间尺度的研究和对天体导航和天文学用的时间尺度的研究。

系统同步用的时间尺度

很久以前,人们简单地满足于让太阳支配自己的日常生活,日出表示时间上升,工作开始。日落即一天结束。随着人类生活日趋文明,商业与城市生活的发展,生产技术的提高,一些社会团体建立起来了,它们安装了各种类型的时钟,这些钟调节到与太阳视在运动基本一致。因而发展了地区时间这个概念,每个团体都有它自己的本地时间。显然,在通讯与业务交往限定在一定的团体或地区进行时,这是一个切实可行的办法。随着铁路和高速通讯的出现,混乱不堪的各个地区时间必须结束,铁路被认为能将美国大陆的各个地区时间统一成时区,结果产生了更有效的国家时间制。1844年国际会议推荐以英国格林威治子午线为经线和时间的基准子午线。每15°经线代表一小时的时区时差,格林威治经线最东和最西时差

±12 小时。

这个简单的历史进程说明,由于交往联系的越来越快和越来越远,对于普遍适用的统一的关于彼此同步时钟的协定的要求也越来越高。即这个协定是为了方便起见,我们钟的读数,并不是神圣不可侵犯的或者是绝对的。重要的是能读出相同的时间(或者在时区之间要有明确规定的时差)。在铁路作为横跨北美大陆的主要运输工具的时代,几秒时间准确度已足够了。但是,今天,复杂的通讯设备能够在几秒钟内发送和接收几百万个阿拉伯字母,时钟同步的精度需要达到 10^{-6} 秒,甚至更高。

天体导航和天文学用的时间尺度

如前所述,对于天体导航来说,时间是重要的。假如人们知道某个参考点,比如说格林威治子午线是什么时间(即太阳时),并由日规指示知道他的地区时间,根据地球 24 小时转 360° ,他就可以绘出他所处地点的经度。譬如,正午格林威治平均时,即 0200 夏威夷标准时,有 10 小时时差。这样,人们就很容易地算出夏威夷在世界上的位置是离英国格林威治 $10/24$ (即在基准子午线以西 150°)。假如这个人用导航六分仪测出空中太阳的实际位置,他就能更准确地确定地区太阳时。关键的问题是要知道对格林威治子午线的修正时间。

约二百多年前,英国人哈里逊(Harrison)因设计和建造能在海上准确测定经度的经线仪得到 2 万英镑的奖金(该经线仪在海上航行 5 个月之后误差小于 1 分)。直至本世纪初,无线电信号实用后,海上导航才完全依靠精度更高的钟。目前,世界各地已有许多标准时间授时站,它能提供准确度优于第一世界时(UT1)1 秒的时间信号。

假如能够以足够准确度和方便地测量天文时,那么,天文时也能用于系统同步。事实上天文时难以进行测量,而且,只有用具有复杂的先进设备的天文台对整夜观测的数据取平均后,才能实现千分之几秒的准确度,要确定第一世界时(UT1)的准确度,至少需要两个经线位置离开很远的天文台的测量。

结 论

本文讨论了时间的两种不同应用。第一种是协定时间。它经世界公认后,可在高速高效交通通讯系统中发挥作用。它要求极精密和均匀的时间测量。第二种用于天体导航和天文观测。它不需要高精密度的时间,至少不必达到第一种时间所要求的那样精密度。

由于这两类时间尺度的用户在时间尺度的使用上有抵触,因此为了获得协调时间尺度,已进行了大量的工作。这种协调的时间尺度正确地反映出这两类用户的相对重要性。人们可以想象,随着通讯设备的日趋复杂和变得重要,随着电子导航系统不断代替天体导航,协调时间尺度的趋向已经不是基于地球转动的的时间尺度,而是趋向于纯粹的原子时间尺度。

在协调时间尺度(UTC)方面,人们碰到一个非常熟悉的问题。一年中的“日”不是整数,人们亦不希望日历与季节太不一致。同样,一个太阳日中的秒也不是整数,人们亦不会希望我们的钟与太阳不很同步。如上所述,解决的办法与外加“日”的闰年相似,即必要时采用外加(或减)“秒”的办法——闰秒。

译自《Time and Frequency: Theory and Fundamentals》p. 3~11

任伟天译 郑裕民、曾稳盛校

原子时间尺度的准确度

Dr. B. Guinot J. Azoubib M. Granveaud

原子时间尺度是累积了许多尺度单位而构成的。每个尺度单位只有在一定条件下, 与国际单位制(SI)的秒一致时才是准确的。例如, 国际原子时间尺度(TAI)只有当它的尺度单位在海平面上与国际单位制秒的持续时间相同时才是准确的。只有使用实验室铯基准才能得到极限准确度。

按照定义, 铯基准给出国际单位制的秒。这样获得的秒与真正的秒有偏差; 这个未知差值为误差。该误差的上限估计值为已知数并称为不确定度。把这个实现的秒与能获得的原子时间尺度(通常是一个地区的时间尺度)的单位进行比对。这种比对也称为时间尺度的校准。把在给定时间间隔上的扩大的校准定义为时间尺度频率与标准频率间的差值的测量。

考虑到频率单位与时间间隔单位赫和秒相互关联的定义, 校准结果也可用标准与时间尺度之间的频率差表示。这里讲到的频率为标准化的频率, 它是真实频率与标准化频率的比值。下面将采用标准化的频率。

这个问题首先由 Yoshimura, 其后由 Guinot 研究过, 他们设计了一些滤波器, 滤波器的系数是每次校准值的倍数。基于与 Yoshimura 相同的基本设计思想, 我们研制了一种更适用的滤波器。

Yoshimura 将预计值与插入值区别开: 第一种情况, 全部校准是过时的。在我们的分析中, 这种区别毫无必要, 我们只讲尺度频率的估计值。

这些校准也许涉及到一个地区独立时间尺度, 或者, 从更广义的观点来看, 它们涉及到其它任何时间尺度。

本文将选择国际原子时间尺度(TAI)作为参考尺度。同时必须解决两个问题: (1) 地区时间尺度到国际原子时间尺度的传送, 它须包括空间传送; (2) 各种校准数据到有关同期数据的结果传送, 它须包括时间传送。其中的每一种传送可以做在另一种传送之前, 因而得出两种方法。本文首先谈及空间传送。在对国际原子时间尺度的应用中可以看到, 这种传送必须谨慎从事, 以便把能增大的校正噪声降到最小。

工 作 设 想

有三个主要的设想:

1. 时间尺度的随机误差与标准误差无关。这意味着, 一边, 实验室建立的基准在运行; 一边, 用某些标准——通常是商品标准——产生连续稳定的时间尺度。

2. 某个标准 j 的误差与另一个标准 k 的误差彼此无关。可以设想, 由不同的人在不同的国家建造的两台基准, 即使它们的时间与频率的一致性很好, 但仍然互不相关。又如, 同一人在同一个国家建造的几台标准, 那就很难说这些标准是相互独立的。设想用新的概念

来获得与过去完全不同的结论。

3. 一个标准的系统误差与该标准的随机误差无关。因为误差是未知量,所以这第三设想必须从理论方面去理解。但是,从实际的观点考虑,要区分系统不确定度与随机不确定度是非常困难的。

参 考 时 间 尺 度

参考时间尺度的频率通常可表示为时间的函数:

$$y(t) = 1 + f(t) + g(t)$$

式中: $f(t)$ 为一个系统项。然而,在下面,我们假定这里引入的参考无系统漂移,或者漂移已被消除,则

$$f(t) = c$$

即为常数。

$g(t)$ 代表参考的频率随机起伏。它们的平均值为零,其频谱密度用傅里叶频率的整数幂表示。在实际使用中,它们通常是用在一个时间间隔上平均的频率的对方差(或称阿伦方差)来表征其特性的。此外,还假定时间尺度与标准无关。

校 准

从标准 j 输出的频率可以表示为时间的函数:

$$y(t) = 1 + z_j + d_j(t)$$

式中 $d_j(t)$ 表示标准 j 的频率起伏。除了对 j 有特定条件之外,它与 $g(t)$ 十分相似,它们的系综和时间平均值都为零。此外,任何两个时间系列 $d_j(t)$ 与 $d_k(t)$ 都是相互独立的。随机误差不确定度将被定义为标准偏差 $d_j(t)$ 在时间间隔 h 上的平均值。

$$\sigma_A^2 = E[\langle d_j(t) \rangle_h^2]$$

式中 E 表示一个系综平均值,而符号 $\langle \rangle$ 则用于时间平均。

z_j 是一个系统项,它是由于为保证准确度要作全部修正而对这种修正又不完全了解所引起的。实验室得出的 z_j 的估计极限 $\sigma_s(j)$ 称之为系统误差不确定度。在系综平均值中,假定不同标准的 z_j 和 z_k 彼此无关,假定 z_j 和 $d_j(t)$ 也互不相关。在对任何标准进行完整的重复估评之后,可以认为,一个新的标准,就准确度而言与下述关系有关: z_j 和 $d_j(t)$ 变为 z_k 和 $d_k(t)$ 。所以,如果二次估评间某些校准是在同一个标准上进行, z_j 将为常数,因而在标准的系综上的统计特性为:

$$E[z_j] = 0$$

$$E[z_j^2] = \sigma_s^2(j)$$

$$E[z_j \cdot z_k] = 0$$

$$E[z_j \cdot d_j(t)] = 0 \quad (\text{对于任何 } t)$$

假定估评无偏差。

上述特性足以用来研制一种滤波器。然而,亦可以考虑其它的方案,其中设 z_j 为未知数。然而只有给出附加条件时才能求解(它将未知的附加常数归到 z_j 上)。因此,只有考虑