

# 秒的定义及其演变

王 桐

(中国计量科学研究院)

本文介绍了时间基本单位秒的定义及其演变,简述了秒定义复现的原理和方法。

秒是一个基本物理量,也是七个基本单位之一。

人类研究和掌握自然规律,需要知道平均流逝的时间和定义恒定不变的时间标尺,秒就是探测和研究物质的运动和变化的基准,它是因人类的需要而创立,亦随人类的进步而不断地改进和提高。目前,秒的准确度高达  $10^{-14}$  数量级,是任何其他物理量所不可比拟的。为此,人们常常把许多物理量设法转换成频率(时间)来进行测量以提高精度。例如,通过约瑟夫森效应把电压量转换为频率量;通过光速把长度和频率统一起来等等。不言而喻,其优点是高分辨率、高准确度及量值传递的手段多样而简便。

其次,由于上述特点,时间频率计量不仅广泛地应用在日常生活诸方面,而且在导航、通讯和地壳形变等技术领域中是不可缺少的。同时,也是测量物理常数和检验物理理论(如相对论)的精密实验的必要工具。

在国际单位制(SI)中时间基本单位秒是出现最多和应用较广的基本单位。国际基本单位制中有长度、质量、电流、时间、热力学温度、物质的量和发光强度等七个基本单位,其导出单位为频率、力、压强……等19个量的单位,都有专门的名称,分别为赫兹(Hz)、牛顿(N)、帕斯卡(Pa)等。当用七个基本单位表示时,其中竟有16个单位包含时间单位,如  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{N} = \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $\text{Pa} = \text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$  等。这足以说明时间基本单位秒是多么重要。

本文将秒的定义、演变及其复现作一扼要

的介绍。

## 一、秒定义的产生及其背景

古代,人类随着太阳东升西落,周而复始的生活,发现了“年、月和日”。随着生产力的发展,特别是在欧洲工业革命之后,火车开始按时刻表运行,工业实行轮班作业制,于是出现了规范的“时和分”。18世纪末叶,由于科学技术的高速发展,特别是精密计时仪器的出现,人们逐渐感到“分”太长了,需要有一个比它更短的时间单位——秒。

1789年,法国制宪会议针对严重阻碍科学技术发展的度量衡混乱状况,建议法国科学院成立一个特殊科学委员会制定新的计量标准,这一建议得到与会代表和许多著名科学家的支持和响应。之后,该委员会通过30多年对从古至今人类以相对于太阳位置的地球自转确定时间的研究和分析,于1820年正式提出了时间基准秒长定义,即

**全年中所有真太阳日的平均长度的86400分之一为一秒。**

所谓“真太阳日”就是天文学家把太阳连续两次通过观测地点子午线(一天中太阳视运动的最高位置)所经历的时间。

从这个定义可以看出,把全年中所有真太阳日加在一起,然后再除以365,得到一个平均日长,人们通常称它为“平太阳日”。将平太阳日24等分得小时,每小时60等分为分钟,每分钟再60等分为秒,这个秒也称为“平太阳秒”,86400即为一个平太阳日的平太阳秒。

用平太阳秒定义得到的时间单位准确度最好为  $1 \times 10^{-9}$ 。

法国科学家提出的上述定义解决了一秒有多长的理论，这是一项很有意义的工作。但是在实际应用中，这种秒必须利用一年的时间来观测，最后取平均才能知道一秒有多长，这是很不方便的。为了解决这个问题，美国天文学家纽康在 19 世纪末提出用一个假想的太阳代替真太阳，作为测定日长的参考点。这个假太阳在天赤道上作匀速运动，其速度等于真太阳在一年中视运动速度的平均值，并尽量靠近真太阳。这样，天文学家就可以根据恒星周日视运动与假太阳之间的关系，实时地测定平太阳时的日长和秒长。1886 年，在法国巴黎召开的国际天文学术会议上，一致同意用纽康方法严格地定义平太阳日，从而获得了科学的平太阳时的秒长。后来，天文学界又规定在英国伦敦格林威治观测得到的平太阳时叫做“世界时”（记作 UT）。

由于天文学家的不断观测，发现地球自转速度并非恒定不变，通过精密测定表明，地球自转速度有以下三种变化。

首先，由于存在潮汐摩擦力而使地球自转速度逐渐变慢，结果平太阳日每年约增加 0.001 秒。经过计算表明，12 亿年前的古代，昼夜之长为 18.8 小时，而现在一天确是 23.93 小时。

其次，地球表面的气团随季节而移动，使地球自转速度产生了季节性变化，春季变慢，秋季变快，周年变化的幅度为 20—25 毫秒。

第三，由于地球内部物质的移动引起地球转动惯量的变化，使地球自转速度有时加快，有时减慢。例如，在 1872 年与 1903 年间发现平太阳日增加了七千分之一秒，而在 1903 年与 1934 年之间，它又减少了五千分之一秒。

地球自转速度的变化是英国天文学家琼斯在 1939 年宣布的，这个发现从根本上动摇了平太阳时的秒长定义，也就是说，平太阳时和真太阳时一样，都没有固定不变的时间单位，平太阳时的秒同样是时伸时缩的“橡皮秒”！因此必须寻找不变的时间基准。

## 二、秒的第二次定义及其原由

天文学家经长期的观测发现，虽然地球公转速度在一年中的不同季节是变化的，但它公转一周的时间都相当稳定。于是科学家推想，如果把地球公转周期的若干分之一定为一秒，这样的秒长一定相当均匀。但是，要得到这样的时间，必须精确地掌握地球公转运动规律，就是说，必须精确地测量太阳的周年视运动情况。纽康根据地球绕太阳的公转运动编制了一份太阳历表，在此表中，每给定一个时刻，就能查出太阳的一个相应位置。那么，能不能把问题反过来？当观测到的太阳出现在预定的位置时，它就给出了相应的时刻，这样任何一个运动规律已知的天体都可以作为一个钟来使用。于是，1952 年国际天文学会第 VIII 届大会（在罗马召开）决定以纽康太阳历表为基础定义了一种新的时间尺度，这就是学术界所说的“历书时”（记作 ET）。1955 年国际天文学会第 IX 届大会（在都柏林召开）赞成将秒同回归年联系起来的见解。1956 年国际计量委员会根据国际计量大会授予的权力，推荐根据历书时确定的秒为国际单位制的时间单位的定义。1960 年国际第 XI 届计量大会批准历书时确定的秒作为国际单位制的时间单位，其定义为：

**1900 年 1 月 0 日历书时 12 时起算的回归年长度的  $1/31556925.9747$ 。**

这个定义有两点需要说明：

首先，这个分母来源于一个回归年，等于 365 个平太阳日 25 小时 48 分 45.9747 个平太阳秒。

其次，这个基于地球公转运动的计时基准，实际上选取了回归年的长度，即太阳中心连续两次通过轨道上春分点时所经历的时间。但是，回归年的长度也是随时间而变化的，为了消除回归年的影响，选取一个固定的年，即可避免由地球运动快慢所造成的不均匀，这个时刻选为 1900 年 1 月 0 日 12 时。

从这个定义可以看出：

首先，这个定义实际上规定了历书秒等于

1900年的平太阳秒。历书秒继承了这个秒长，并把它保持下来。一个历书日等于86400历书秒，是固定不变的。而平太阳日变化长短均与它无关。

其次，虽然在理论上有了一个均匀不变的秒长单位，但实际上得到这样的秒长是相当困难的，因为观测太阳比较困难，人们只能通过观测月亮等其他天体来测定历书时。我们知道，月亮是一个视圆面比较大的天体，边缘又不十分整齐，用现代子午环、中星仪和月亮照相仪等天文仪器，经过几年观测，所得到历书时的精度，只能达到 $10^{-9}$ 量级，比平太阳时精度高出仅一个数量级，仍然不能满足现代科学技术对于时间精度的要求。

第三，由于目前人类对于各种天体运动规律的认识，还远远没有达到尽善尽美的程度，在这种情况下通过天体观测测定的时间就遇到两个方面的困难：(1)基本理论上的困难，即尚未搞清时间测量赖以为基础的天体运动规律；(2)技术上的困难，天体的光线经过地球大气到达观测仪器，大气对星光的折射大大地限制了地面观测精度，目前在地面上利用光学望远镜观测恒星世界时，其精度只能达到千分之几的水平。因此，如果从宏观天体再去寻找时间基准将是困难的。

### 三、秒的第三次定义及其意义

本世纪初，由于量子论和量子力学的发展，使人们把寻找时间基准从宏观世界转向了微观世界。首先，英国生物学家达尔文的后代G.达尔文于1927年第一个从理论上探讨了这个问题，即把磁场中自旋的量子化取向与共振现象联系起来的理论。接着，物理学家弗浦斯和佛里奇等人对微波波段进行了首次的波谱实验。1936年著名物理学家拉比提出了获得原子跃迁振荡频率的基本理论和方法，初步显示出利用原子振荡频率控制时钟的可能性。其次，1949年美国国家标准局首先利用氨分子( $\text{NH}_3$ )跃迁做出了氨分子钟。五年后，英国物理研究所终于把铯原子( $\text{Cs}$ )套到了时钟上，做成了世

界上第一架铯原子钟。此后，其他类型的原子钟相继问世，主要有氢原子钟和铷原子钟等。其中联邦德国物理技术研究院的铯钟准确度最高，达到 $10^{-14}$ 量级。

原子钟出现后，物理学家便主张用原子钟来定义时间的基本单位——秒。也就是说，以在历书时的一秒钟内，跃迁的铯原子共振振荡了多少次来定义秒。这一工作最初是在美国海军天文台和英国物理研究所之间进行的，经过近五年的实验与测量，他们得到在一个历书时秒内，铯原子跃迁振荡平均为9192631770次。其他实验室大量测试结果表明，这一测量值是可信的。因此，1967年10月在印度新德里召开的第XIII届国际计量大会通过秒的新定义，即国际单位制中时间基本单位是秒，其定义为：

**秒是铯-133原子基态的两超精细能级之间跃迁所对应的辐射的9192631770个周期的持续时间。**

另外，还规定原子钟给出的时间叫“原子时”(记作AT)，原子时标准的始点定在世界时的1958年1月1日0时0分0秒。但是，由于当时技术上的原因，并没有真正做到这一点，后来发现，在这一瞬间原子时比世界时慢了0.0039秒。这一差值在日常生活中是不容易觉察出来的，在科学上也只是作为一个历史事实而被保留下来。

从这个定义可以看出：

首先，原子秒定义与平太阳秒和历书秒定义的区别在于：在平太阳秒和历书秒定义中，时间的基本单位是日或回归年，它由恒星位置给出，钟只用于保持时间，并把基本单位细分成方便应用的较小单元——时、分和秒。而在原子秒定义中，时间的基本单位是秒，它由原子的振荡频率确定。对于较长的时间间隔，如时和日等，则由秒的连续累加给出。钟不仅被用于保持时间，而且它本身就是时间尺度的产生器。

其次，在国际单位制中引进原子时，使长期以来一直占统治地位的宏观天文时间基准从此退出了历史舞台。现在，可以确切地说出一秒倒底有多长：**一秒，就是铯原子跃迁振荡**

## 9192631770 周所经的时间.

第三,从前面的介绍可以看出,时间本来就是与地球自转密切相关的量,自古以来一直支配着人类和所有生物的生活,但目前使用与它们毫不相关的铯原子跃迁来定义,这决不是说脱离了地球、太阳和人类生活.新定义的秒只不过是使其比过去的秒更稳定,更准确描述宏观世界和微观世界的行为和状态罢了.

1971年第XIV届国际计量大会正式认可原子时标,同时指定在国际时间局的原子时基础上建立国际原子时(TAI).

国际原子时是国际时间局根据国际单位制时间基本单位秒的定义,以各研究所运行的原子钟读数为根据,在海平面上建立的时间参考坐标.

目前,大概有分布于世界40多个国家(包括中国)的研究机构的近二百台不同型号的原子钟为TAI提供数据,在这些数据的基础上,国际时间局经过计算并对时标准确度进行控制,最后,TAI达到如下技术指标:

读数准确度:  $\pm(0.2-0.5)$  微秒 ( $\mu\text{s}$ ),  
 频率准确度:  $\pm 1 \times 10^{-13}$  (年平均),  
 稳定度:  $\sigma_{(2,\tau)} = (0.5-1.0) \times 10^{-12}$ ,  
 $2 \text{ 月} < \tau < \text{几年}$ .

## 四、秒定义的复现

### 1. 基本原理简介

根据量子力学的基本原理,氢原子及碱金属原子(铯原子是碱金属之一)的角动量  $I$  和电子角动量  $J$  的磁相互作用,导致铯原子的基态能级发生超精细分裂,其能级对应的量子数分别为  $F = I + J = 7/2 \pm 1/2$ , 即  $F = 4$ ,  $F = 3$ . 超精细能级在外磁场中进一步发生塞曼分裂,为  $m_F = |F|, |F| - 1, \dots, 0, \dots, -|F|$  等共  $(2F + 1)$  个磁亚能级,由量子数  $F$  和  $m_F$  决定各个能级的能量,各亚能级的能量与外磁场的大小有关.同时,因受量子力学的选择定则限制,跃迁只能在满足条件  $\Delta F = 0, \pm 1$  和  $\Delta m_F = 0, \pm 1$  的能级之间进行,其中  $F = 4, m_F = 0$  和  $F = 3, m_F = 0$

物理

两能级之间的跃迁频率,对磁场的变化不敏感,因而被选作时间基准,并且用来定义原子秒.铯原子的跃迁频率为

$$f_H = \frac{W_{4,0} - W_{3,0}}{h},$$

式中  $h$  为普朗克常数,  $W_{F,m_F}$  是以量子数表征的能级能量的大小.上式经过整理,变成以下熟悉的形式:

$$f = f_0 + K H_0,$$

式中  $K$  为系数,  $H_0$  为静磁场强度,按照原子秒定义,  $f_0 = 9192631770 \text{ Hz}$ . 这就是秒复现的基本原理.

### 2. 铯原子时间基准器的组成

铯原子时间基准器的基本组成如图1所示.主要由铯谐振器(包括铯炉O、选态磁铁、微波腔和跃迁信号检测器D等)和电子控制线路

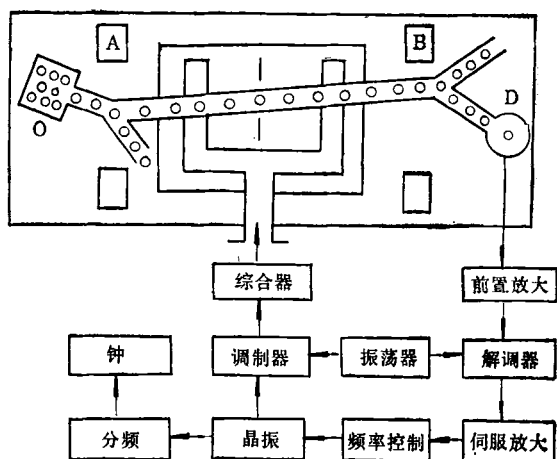


图1 铯谐振器及其锁频电路

组成.图中原子谐振器起鉴频作用,石英晶体振荡器产生一频率为5 MHz的信号,经过频率综合器,产生所选定的铯原子两个能级间跃迁所需要的激励信号,当激励信号的频率等于原子跃迁频率时,原子发生最大的跃迁,原子谐振器发生谐振,并给出与跃迁原子数成比例的电流.当激励信号的频率偏离跃迁频率时,将产生一控制信号去调整晶体振荡器的频率,直到发生原子谐振时为止.这样晶体振荡器所给出的频率的准确度与所复现的原子跃迁频率的准确度一样.晶体输出频率经过分频后即可给

出时间基本单位,完成秒的复现。

### 3. 秒定义复现的准确度

中国计量科学研究院是我国保持和研究时间基准的单位,于1981年建立两台铯束装置,并通过国家鉴定,作为我国的时间基准使用,其准确度为 $8 \times 10^{-13}$ 。

进行时间基准研究的国家还有美国、联邦德国、加拿大、英国、苏联和日本等,其中美国、联邦德国和加拿大研制较早,所达到的准确度最高,均在 $(5-8) \times 10^{-14}$ 范围内。

科学家们为了提高时间基本单位秒的测量精度,为了寻找新的计时标准,艰苦奋斗近二百年,特别是近三十年,发现了微观粒子态的跃迁有稳定不变的周期性,从而找到了以物质微观运动的量子跃迁作为时间的标准。这个从宏观尺度到微观尺度的转变,对现代计量学的发展

起着重要的作用。

目前,秒的复现基本上停滞在 $1 \times 10^{-13}$ 的不确定度上,所以近几年很多科学家在研究和探索新型的量子频标,例如钙、镁原子束频标,小壁移氢频标,激光频标以及大跨度的光频分频等。但是,他们都还没有取得实质性的突破,因此在未来数年内,预计不会出现秒定义的改变。

- [1] A. G. Samuel et al., Time, Time-Life Books Inc., (1980).
- [2] P. Kartschoff, Frequency and Time, Academic Press., (1978).
- [3] 时研究会编,時の科学,コロン社,东京,(1966).
- [4] 秦元勋著,空间与时间,科学出版社,(1966).
- [5] 郭盛焱,中国古代的计时科学,科学出版社,(1988).
- [6] 漆贯英,时间 人类对它的认识与测量,科学出版社,(1985).
- [7] 黄秉英等著,时间频率的精确测量,中国计量出版社,(1986).

## 第四届全国科学和工业中温度测量及控制学术讨论会简讯

第四届全国科学和工业中温度测量及控制学术讨论会,于1989年10月15日至19日在青岛市召开。来自16个省市的科学研究单位、高等学校、生产企业的76名代表出席了会议。

会议的内容反映了我国近两年来在科学和工业中温度测量和控制方面工作的进展。交流的论文有综述评论、温度测量、温度控制、低温技术等方面,共81篇,其中49篇在会上作了报告。

中国科学院物理研究所韩翠英作了《高压或超高压下的低温温度测量》报告,介绍了这一凝聚态物性研究新领域,讨论了研究超导电性中测温的有关问题。中国科学院力学研究所温控公司李鸿德的《轧钢加热炉闭环优化自适应控制系统》,报告了他们利用在线红外测温新技术直接测量加热炉内钢坯的表面温度,并据此修正加热炉的在线数学模型,使计算的表面温度等于实测的钢坯表面温度,进而自动设定炉气温度,以实现闭环优化控制的目的。大连大学工学院李学慧的《焊管机组焊缝温度的测量及控制》,介绍他们采用红外双色单通道进行温度测量和控制。他们利用同一被测焊缝在两个波长下的辐射能量的比值随温度变化这一规律来确定焊缝温度。用光纤传输双色单通道,用微机检测温度信息和进行PID控制,使高频炉输出恰当功率,确保焊缝处于最佳焊接温度。

西北轻工业学院微机所王孟效的《批量PID控制在纸机网温控制中的应用》,提出了一种新的批量PID

控制算法。用此控制法可使温度快速无超调地调整到设定值,因而可获得快速响应,且有较高的稳定性。它的工作原理是,当偏差值大于某一阈值时,调节器处于全开或全关状态,使调节过程加快。当偏差值小于此阈值时,由微机送出一个回程量,并进入PID调节,从而有效地克服超调或振荡。上海仪器仪表职工大学唐新南研制的精密温度程序控制仪,是新一代数字智能化控制仪表。它能同时实现对热电偶信号的放大,冷端自动补偿、非线性修正、多段控温曲线的数字给定、直接温度设定和显示、数字PID运算、超温报警和输出限幅功能、输出电流和可控硅移相脉冲,并可扩展联接打印机和记录仪。新疆大学卢建宇的《用微机控制大型机械孵化室的温度》,中国科学院海洋研究所曹洁玉的《遥测温度计》(能对10km范围内的海水温度进行遥测),西安电子科技大学张锡华的《红外测温仪》,温热管黑体定标源研制,西安交通大学丁胜群的《离子注入工件温度的测量装置》,中国原子能科学院李禾的《钠温度巡回检测装置》,上海科学技术大学顾绍山的《铁电体电容数字温度计》等,都是做得比较好的工作报告。

与会代表通过学术上的切磋研讨,沟通了信息,加强了今后的联系及协作。学术讨论会取得圆满成功。第五届科学和工业中温度测量和控制会议将于1991年在大连市召开。

(沈云野)