

原子时标: 闰秒和取消闰秒*

高源[†] 张爱敏 李天初^{††}

(中国计量科学研究院 北京 100013)

2015 - 05 - 04 收到

[†] email gao@nim.ac.cn

^{††} email litch@nim.ac.cn

DOI :10.7693/wl20150605

摘要 为什么用原子秒(秒长)和原子时(时标)取代天文秒和天文时?目前,经过闰秒的原子时,即协调世界时,是全世界通用的时标。那么,为什么引入闰秒?又为什么要取消闰秒?从时间计量的角度,如何解读最近53年闰秒背后反映的地球自转数据?取消闰秒,时间会“日夜颠倒”吗?最后,人们还会经历几次“闰秒”?

关键词 计量学, 时间频率计量, 原子时, 闰秒和取消闰秒

1 “时间频率”的科学释义

时间是“时刻”和“时间间隔”的简称。秒(秒长)、周期都是时间间隔,而频率是周期的倒数。我们平时所说的时间,其实指的是规定了起始时刻,连续累积得到的年、月、日、时、分、秒时刻。比如规定了公元起点,现在就是2015年某月某日。

世界通用的国际计量单位制规定了7个相互独立的基本单位:时间秒、长度米、质量千克、电流安培、温度开尔文、发光强度坎德拉、物质摩尔。其他所有物理量都可以从这7个基本单位导出。秒是基本单位中准确度最高、应用最广、最适于远程传递的一个。基本单位中的长度单位米,电压单位伏特都直接用秒来定义。许多其他量,如果转化到时间频率测量,常常事半功倍。

国家时间频率体系通常由“秒长基准装置—时标基准装置—时间频率发播—时间频率应用”四个层次组成。时间频率体系是现代国家

的基础设施之一,它在前沿科学研究、国防安全、经济建设和人民日常生活中都发挥着不可或缺的重要作用。最稳定的频率用来验证基本物理规律和检验物理常数的变化;交通、电力和高速通信依靠高精度的时间频率同步;大地测量、深空探测、精确打击需要精准的时间频率资源支持;高准确的时间是超光速实验的基础。时间频率最典型、最成功的应用莫过于卫星导航。最初的卫星导航系统为军事应用而建设,如今已进入寻常百姓家,成为日常出行工具。以美国全球定位系统(GPS)和中国北斗系统(BDS)为代表的卫星导航系统有三项基本功能:定位、导航和授时,前两项依赖精密时间同步,后一项则直接依靠时间的准确度。

2 从天文时到原子时

日出而作,日落而息。时间是人类最早认知的自然现象之一。基于地球自转的时标称为“平太阳时”,基于地球公转的时标称为“历书时”,两者都属于天文时。天文秒长依靠天文观测的平均周期导出,比如“平太阳时”的秒长=平均日长/

86400。也就是说,先借助天文观测得到地球自转的平均周期(日长),然后“细分”得到秒长。

科学技术的发展逐渐揭示,物理现象的时间稳定性优于天文现象。也就是说,尽管地球是一个巨大的质量体,但它的运动速率仍然时快时慢。当然这里时快时慢的“时”不仅仅是指我们日常生活的一月一年,而是天文时间的概念,数百年以至数千年。整个天体中所有星球(包括地球)的运动和质量分布变化都会引起地球运动的变化。这使得地球自转和公转运动的规律极其复杂,以致就人类现有和可预见未来的知识来说,还很难预测。到上世纪中叶,随着量子物理的诞生和发展,科学家得以利用量子现象测量时间。1955年第一台铯原子钟诞生^[1]。1967年,国际计量大会决定用原子秒取代天文秒,秒长定义是碱金属铯133同位素(¹³³Cs)基态两个超精细能级之间跃迁辐射的9192631770个周期所持续的时间间隔^[2]。又经过几年过渡,1972年实验室型铯原子基准钟正式成为复现秒定义的手段。对比天文时,原子时标是先定义秒长,然后“累积”秒,得到分、时、日和年。原子钟产

* 国家重点基础研究发展计划(2010CB922902)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ090943)资助项目

生的秒长“积累”86400次，就是一天。那么，原子秒定义中9192631770这个数具体是怎么得来的呢？就像任何新事物都脱胎于旧事物一样，科学家在定义原子秒的时候，用当时尽可能准确的天文秒长做“尺子”，尽可能准确地测量 ^{133}Cs 相应的跃迁周期数。也就是说，在1个天文秒里，他们数出 ^{133}Cs “振动”了9192631770次^[3]。从此，原子时取代了天文时，时间由原子钟产生。

3 原子秒长有多准？

自从原子秒定义取代了天文秒，铯原子基准钟就成为复现原子秒长的装置。就像用尺子丈量长度，用秒长测量时间。按照原子物理理论，下述普朗克方程表明，粒子跃迁辐射电磁波的频率 ν (1/周期)只取决于相关能级的能量差，即

$$\nu = \Delta\varepsilon/h,$$

式中 ν 表示频率， $\Delta\varepsilon$ 为能级差， h 为普朗克常数。相对来说，定义秒长的 ^{133}Cs 超精细能级非常稳定，跃迁谱非常纯。秒定义假设了理想的物理条件，即基准钟在海平面工作， ^{133}Cs 跃迁不受任何外界干扰。因此理论上，原子秒定义没有误差。但复现秒定义的基准原子钟实际上不可避免会受到外界干扰，发生频率偏移误差。基准钟在实验室工作时，温度、湿度、磁场、振动、电磁辐射、海拔高度等等条件都可以严格控制 and 测量。加之，在理论模型的指导下，基准原子钟对残余干扰引入的一系列频移误差进行评定和修正。因此，原子秒长稳定度比天文秒要好上数亿倍。

基准原子钟利用最先进的原

理、技术和工艺，在计量实验室条件下，以尽可能好并且不断改进的准确度复现秒长定义。1991年法国Clairon小组报道了最新一代的激光冷却铯原子喷泉基准钟^[4]。目前全世界最好的铯喷泉基准钟的相对准确度达到 $(4.6) \times 10^{-16}$ ，相当于8000万年差1秒。

中国计量科学研究院从1997年开始研制铯原子喷泉基准钟，2003年第一台NIM4铯喷泉基准钟通过鉴定，准确度400万年差1秒；2011年第二台铯喷泉钟NIM5通过鉴定，准确度1600万年差1秒^[5]；现在正在研制NIM6，预计2017年完成，希望届时准确度达到国际领先水平。

现行秒定义在微波频段。近年来，国内外都在积极研制光钟，光钟工作在光学频段，稳定性和准确度都具有比微波钟好1万倍的潜力^[6]。

4 全世界统一的时间——协调世界时

4.1 北京时间 是在北京天安门的时间吗？

尽管在现今原子时标的体系里，我们仍然沿用“北京时间”、“格林尼治时间”，但在原本意义上，它们都属于天文时的概念。关于这一点，我们在下文中会具体说明。

现代时标自天文时的时代就面临国际化。1884年召开的国际经度会议，决定在全球划分24个时区，每个时区横跨经度15度，英国伦敦郊区的格林尼治天文台为零时。时区中央经线上的时间就是这个时区的时间。中国现在采用的标准时间是北京时，实际上是东经

120°的时间。北京中心的地理经度为东经116°21′，因而“天安门时间”和“北京时间”要相差14.5分钟之多。

4.2 国际原子时是如何产生的？

原子秒长由基准钟产生，原子时间也不再靠观星星测太阳了。现在全世界通用的时间称作协调世界时 (coordinated universal time, 简称UTC)，它是由国际计量局(BIPM)主导，全世界70余家守时实验室参加的国际原子时合作，经由以下步骤产生：各守时实验室的原子时—国际原子时—UTC。在本节里，我们先介绍实验室原子时和国际原子时(图1)。

分布在世界各地的70多家守时实验室，各自利用商品守时钟组成的钟组，一年到头不间断地“守时”，产生自己的原子时标。

各个实验室的时标通过卫星进行比对，再将比对数据报送BIPM，经“加权平均”得到自由原子时(EAL)。然后利用少数几个国家的铯喷泉基准钟进行校准，产生国际原子时(TAI)。图1中虚线框内是BIPM的工作。BIPM每30天发布一次《时间公报》(Circular T)，公布国际原子时与每个守时实验室时标之差。各守时实验室据此校对自己的时标后，称作地方原子时。各个守时实验室在校对之前独立产生的时标的时刻准确程度参差不齐，比较好的大约为6万年差1秒，经过《时间公报》校对提高的程度也多少不一，修正结果比较好的地方原子时准确度大约可以改善100倍，达到600万年差1秒。

中国有4个守时实验室，位于北京的中国计量科学研究院(NIM)国家时间频率计量中心、北京卫星导航中心(BSNC)、北京无线电计

量测试研究所(BIRM)和位于陕西临潼的中科院国家授时中心(NTSC)。除了北京卫星导航中心,都参加了国际原子时合作,产生各自的地方协调时UTC(k)。图2表示2011年至今中国计量院协调世界时UTC(NIM)与UTC的差基本保持在 ± 10 ns之内。

2014年中国计量科学研究院研制的NIM5铯喷泉钟通过了国际频率基准工作组的审查,与法、德、美、英、俄、意一起,正式参与校准国际原子时(见图1)。从此,中国在国际原子时合作中不但有话语权,而且具备了“表决权”。

4.3 协调世界时：为什么要闰秒？

从上一节的叙述可以看出,尽管原子秒长的定义是从天文秒脱胎而来,但国际原子时是一个纯粹的原子时标,和天文完全无关。

1967年,原子秒正式取代天文秒。实际上,自上世纪中期就开始测量比对原子时和天文时,结果发现两者逐渐出现了偏差,且渐行渐远。怎么办?1970年,当时的科学家决定建立协调世界时UTC,作为一种“折中”时标^[7, 8]。即当国际原子时TAI和天文时UT1两种时标差到0.9 s,在下一个6月或12月最后一天的最后1分钟增加或减少1秒,称为“闰秒”。许多闰秒文章特别强调,闰秒要在6月或12月最后一天最后一分钟的最后1秒钟实施。闰秒由国际地球自转局(IERS)决定,每6个月以公告(Bulletin C)的形式向全世界发布。图3表示自1972年协调世界时正式使用至今,已经实施的25次闰秒,图3右边的纵坐标和图中虚线表示从闰秒推导出的地球自转相对速率波动。据现有数据,自1961年至今,

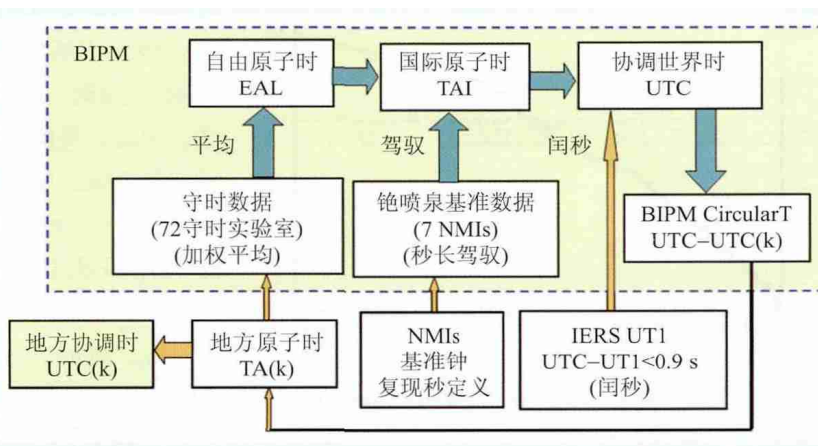


图1 国际原子时合作产生协调世界时(UTC)(图中BIPM为国际计量局, Circular T为时间公报, NMIs为各计量院, IERS为国际地球自转局, UT1为世界时UT1)

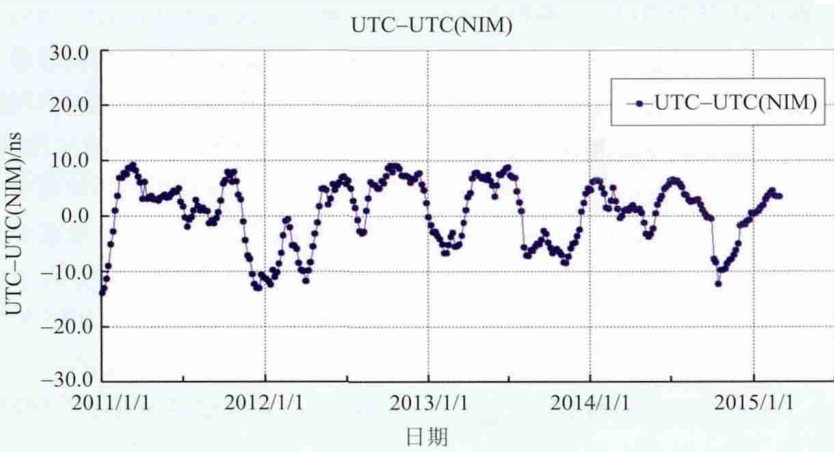


图2 协调世界时UTC与中国计量院(NIM)地方协调时UTC(NIM)之差

协调世界时比国际原子时一共慢了35 s^[9]。

从上文介绍可以看出,原子时标是一个高度国际化的产物。现今全世界通用的协调世界时UTC,其实就是经过“闰秒”的国际原子时。全世界使用一个时标UTC,英国(格林尼治)时间是0时区的UTC+00:00:00;中国(北京)时间是东8区的UTC+08:00:00。

2015年1月5日国际地球自转局发布公告(Bulletin C 49),全世界将在2015年6月30日实施一次正闰秒^[10]。从闰秒的实施时间也可以再一次说明我们使用的时标的国际性:英国将在6月30日午夜0时闰秒,而中国将在7月1日早8时增

加1秒。

回顾一下国际原子时TAI和协调世界时UTC,我们可以归纳出以下三个特点:

- (1)它们不是“实时的”和“实体的”,而是地方原子时数据平均得到的“事后”“纸面”的时标。
- (2)用铯喷泉基准钟校准自由原子时(70多家时标数据的平均值),得到国际原子时。粗略地讲,就有点像我们用中央电视台的整点报时来校对我们的手表。手表一刻不停地“守时”,定期“对表”可以改善手表的准确度。
- (3)全世界使用同一个时间,中国时就是东八区协调世界时,等于UTC+08:00:00。

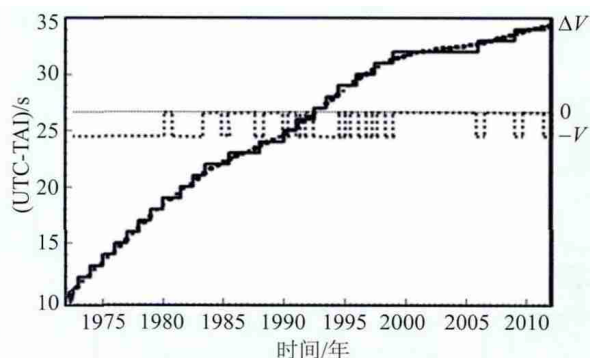


图3 1972年至今的闰秒记录(图中虚线和右边纵坐标表示地球自转相对速率波动)

5 我们还会经历几次闰秒？

5.1 为什么要取消闰秒？

直至今日，通过各种渠道，以各种方式列举的闰秒的理由连篇累牍，随处可见。实际上，从本世纪初，科学界就开始研究取消闰秒。究其原因有二：一些支持闰秒的理由经不起细究；闰秒带来许多弊端。因为地球的自转速率变化不可预测，使得闰秒没有规律，不能自动实施，只能依靠人工干预。闰秒不但耗费人力物力，而且存在误操作的风险。国际计量局在全世界范围组织了广泛的调查，希望确切了解闰秒到底有什么正面意义。从应用准确时间的各个领域，都没有得到闰秒有实际应用价值的反馈。原本期待闰秒对天文界影响最大。当询问许多天文学家，他们的第一反应都是闰秒有用，但是当要求他们在书面问卷中举出如果不闰秒的实际影响时，竟然没有人给出不闰秒将带来负面影响的具体实例。其实，在和天文相关的应用里，人们直接使用基于天文观测的但比原子时不稳定更不准确的天文时 UT1。相反，闰秒在众多领域，特别是新发展的许多现代科学技术中显示了负面影响。比如，全球卫星导航系

统的时标如果引入闰秒，势必中断定位、导航、授时的连续性。因此，美国的全球定位系统、中国的北斗系统、欧洲的伽利略系统 (GS) 都采用不间断(不闰秒)的时标。再如，飞船1秒钟要飞行将近8公里，如果无规律地差了1秒，可能造成

飞船偏离原定轨道，使安全受到威胁。据此，国际上在涉及时间频率的两个政府间国际组织(国际计量大会(CGPM)和国际电信联盟(ITU))框架下分别研究取消闰秒的可行性。2007年，国际计量组织多数通过了取消闰秒的建议，国家质量监督检验检疫总局代表中国支持取消闰秒。国际电信联盟将在2015年第三次表决取消闰秒的建议，代表中国的工信部已经就取消闰秒取得共识，将投票支持取消闰秒。

如果取消闰秒，在原子时和天文时之间“折中”的协调世界时(UTC)将回归原子时，成为连续的、各领域广泛适用的全世界通用时标。

5.2 地球自转在变慢吗？

从1961年至今的53年时间里，原子时标比天文时慢了35秒。有的文章说，这表明地球自转慢了，还有的说地球自转“正在变慢”。请注意，“慢了”和“正在变慢”是不一样的。“慢了”的速率和时间差分别为

$$V_2 < V_1,$$

$$\Delta T = (V_2 - V_1) \times t,$$

式中 V_2 和 V_1 分别代表现在和过去的速率， t 是时间。

“正在变慢”则是

$$V_2 = V_1 + at,$$

$$\Delta T = (V_1 - V_2)t + 1/2 at^2,$$

式中 a 是加速度。

显然，地球转速“慢了”，天文时应该随时间线性变长，如图4中的虚线所示；如果地球转速“正在变慢”，天文时应该随时间的平方变长，见图4中的实线。

从图3的闰秒数据推算出，43年来地球的转速一直在上下波动，其平均值比基于原子钟的原子时慢，如图3虚线所示。值得注意的是，图3的闰秒时间曲线变化比“线性”还要缓。其实，原子时与天文时随时间流逝产生差别的原因有三种可能：一是当年定义的原子秒长有误差，可能由于当时依据的天文秒长了一点点，也可能由于测量 ^{133}Cs 的跃迁周期(甚至相位值)少了一点点；二是最近43年地球自转速率平均值真的比当年的平均值慢了；第三种可能则是 ^{133}Cs 的跃迁周期变短了。理论和实验都表明，在闰秒的准确度量级($\sim 0.1\text{ s}$)，第三种可能性可以排除。从科学的角度，第一个原因是说当年原子秒定义值(9192631770周期/秒)有误，而并不是地球自转慢了。然而修改计量单位定义是慎之又慎的大事，只有证据确凿，而且为计量界普遍接受，才可能修改现行 ^{133}Cs 定义值。如果是第二种原因，地球自转速率在最近的43年期间确实慢了，但是几十年的时间长度不足以体现地球自转速率长期变慢的趋势，也可能在今后的几十年时期里，地球自转速率“不变了”，甚至又快了。从能量的角度来看，地球动力学认为地球自转一定会变慢。由于潮汐加速，摩擦力等原因，天文日每世纪增长2.3 ms，但冰河反弹会缩减0.6 ms，所以从天文的时间尺度，天文日每世纪要净增加1.7 ms^[11]。事实上，

地球物理测量显示,1700年至今的310年间,地球转速一直在无规律的波动,但平均值几乎没有变化,见图5^[12]。

如果有确凿数据,可以讨论修改秒定义值。但是综上所述,近53年,原子时和天文时差35s,而按天文时间尺度,53年实在太短,不足以定量地判断地球转速的改变;最近310年的地球物理实测数据显示,地球自转平均值没有明显改变^[12]!至今我们既没有理由证明现行秒定义值有误,也不能根据53年的数据就预言地球自转在未来的几十年期间会是慢了或将持续“变慢”。

5.3 取消闰秒,白天和黑夜会颠倒吗?

就人们的日常生活而言,如果我们使用的时间和日出日落相差几分钟,甚至2小时(就像乌鲁木齐时间),几乎不会带来显著不便。

还有的闰秒文章说,如果不闰秒,白天和黑夜会颠倒。从天文时间的尺度来说,这件事一定会发生。但实际上,我们姑且认为1961年至今的53年间,原子秒比天文秒短了的原因是上文所列原因的前2种。也就是说,定义原子秒时有误

或地球自转真的慢了,天文时53年平均值比原子时每年变慢0.660s,那么我们现在日常生活所依据的原子时与天文时差到12小时(白天和黑夜颠倒),需要65500年!几万年之后的事情,最好还是留给我们的后辈去考虑吧,他们一定比我们更聪明。

5.4 我们还会经历几次闰秒?

取消了闰秒的协调世界时(UTC)将回归成为一个连续的原子时标,与以美国的GPS和中国的北斗系统为代表的原本就不闰秒的高准确时间频率应用相一致,从而促成全世界使用一个统一的时标体系。

如上所述,在国际上,国际计量组织在2007年已经同意取消闰秒,国际电信联盟将在2015年就取消闰秒进行表决。参加表决的国家如何表态,不仅仅是科学

技术问题,而且掺入了其他因素,诸如历史传统,甚至地区的、国家集团的考量。一旦决定取消闰秒,可能会有一个5年的缓冲期,届时,我们最多可能再经历5次闰秒了。

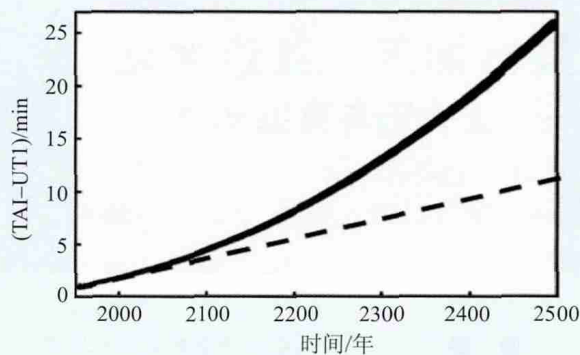


图4 预测原子时TAI与天文时UT1之差(实线表示地球转速在“正在变慢”;虚线表示地球转速比以前“慢了”)

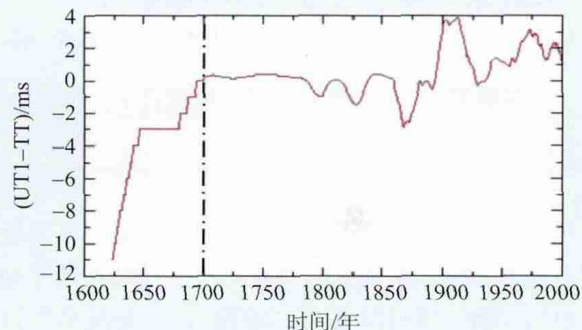


图5 天文时与地球原子时之差UT1 - TT(其中UT1为天文时,TT为地球时,是国际原子时的平均值)

参考文献

- [1] Essen L, Parry J. Nature, 1955, 176: 280
- [2] Resolution 1, 13th CGPM. Metrologia, 1968, 4: 41
- [3] Markowitz W, Hall R G, Essen L et al. Phys. Rev. Lett., 1958, 1: 105
- [4] Clairon A, Salomon C, Guellati S et al. Europhys. Lett., 1991, 16: 165
- [5] Fang F, Li M, Li T et al. Metrologia, 2015, accepted
- [6] 马龙生. 物理, 2008, 37(10): 716
- [7] Recommendation 374, 1963 International Radio Consultative Committee (CCIR)
- [8] Resolution 5, the 15th General Conference on Weights and Measures (CGPM) (1975). Metrologia, 1975, 11: 104
- [9] McCarthy D. Metrologia, 2011, 48: S132
- [10] <http://datacenter.iers.org/eop/-/somos/5Rgv/latest/16>
- [11] Stephenson F, Morrison L. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 1995, 351: 165
- [12] Excess of the duration of the day to 86400 s and angular velocity of the earth's rotation since 1623, <http://hpi-ers.obspm.fr/eop-pc/earthor/ut1lod/lod-1623.html>