

时间计量简史*

邹振隆[†] 译

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

从插在地上的棍子到铯原子钟，人类数千年来一直在用它们以不断提高的准确度来记录时间。海伦·马戈利斯(Helen Margolis)将为您介绍我们是如何达到秒的目前定义，以及时钟技术的未来发展方向。

2018年11月1日，是我在特丁顿英国国家物理实验室(NPL)工作整整20年零6天的日子。我知道这一点的原因很简单——我是1998年10月26日加入NPL的，借助时钟和日历，我可以测量这段过去的时间。但是在时钟出现之前人们怎么办？他们是如何测量时间的呢？

数千年来，人们发明了无数的计时装置，但它们有一个共同点，那就是都依赖于有规则振荡周期的自然现象。计时就是简单地计数这些振荡

来标记时间的流逝。

在历史的大部分时间里，人们选择的周期现象是太阳和恒星在天空中的视运动，这是由地球绕着自己的轴旋转引起的。已知最早的计时方法之一——可以追溯到几千年前——把一根棍子竖在地上，并随着时间的推移跟踪它移动的影子。这种方法发展成为日晷，即日影钟，它用沿着日影路径的刻度将一天划分为若干时段。

然而，除非阳光灿烂，日晷是无用的。于是人们陆续发明了像水钟、蜡烛钟和沙漏这样的机械计时装置。17世纪发明了摆钟，它比以前的任何计时装置都要精确得多。其振荡周期(在最低阶近似下)由重力加速度和摆长决定。由于这个周期

2018-12-03收到

[†] email: zzl@bao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20190102

* 本文编译自Helen Margolis. *Physics World*, 2018, (11): 27

比地球每天自转的时间短得多,所以时间可以细分成更小的间隔,这样就可以测量秒,甚至是一秒的几分之一。

尽管如此,地球的自转仍然是“主钟”,其他时钟需根据这个主钟定期校准和调整。

1 从晶体到原子

随着技术的进步,对高分辨率计时的需求也在增加。摆钟逐渐被石英钟取代,第一个石英钟是1927年由沃伦·玛丽森(Warrenarrison)和约瑟夫·霍顿(Joseph Horton)在美国贝尔电话实验室研制的。在这些装置中,电流使石英晶体以远高于摆钟振荡频率的某个特定频率共振。

与老式计时装置相比,这种时钟的频率对环境扰动的敏感度较低,因此更为准确。即便如此,石英钟依赖于机械振动,其频率取决于晶体的大小、形状和晶体温度。没有两块晶体是完

全相同的,所以它们必须用另一个参考进行校准——这就是地球的自转周期,秒被定义为平太阳日的 $1/86400$ 。

然而,秒的这种定义存在一些问题。随着我们测量这一时间单位的能力提高,越来越清楚的事实是,地球的自转周期并非恒定。这个周期不仅由于潮汐摩擦作用逐渐变慢,而且随着季节的变化而变化,更糟的是,它还以不可预测的方式波动。

1955年,路易斯·埃森(Louis Essen)和杰克·帕里(Jack Parry)在NPL研制出第一个实用的铯原子频标,从而启动了计时领域的革命(图1)。

他们的设备并不是真正意义上的时钟,因为它并不连续运行,只是用来每隔几天校准一台外部石英钟的频率。尽管如此,通过研究共振频率如何依赖于环境条件,埃森和帕里令人信服地证明,与任何基于天体运动的标准相比,隔离良好的铯原子的分立能级之间的跃迁可以提供稳定得

时间的标准化

太阳时并非处处相同。以英国为例,伯明翰落后伦敦8分钟,利物浦落后12分钟。当主要人口中心之间的通讯和旅行时间较慢时这并不重要。但随着19世纪铁路的建设,情况发生了巨大的变化。由于每个车站的地方时间不同造成了混乱,而且随着路网的扩大,事故和未遂事故越来越多。一个标准时间就成为必要了。

1840年由英国西部大铁路带头,“铁路时间”在随后的几年中逐渐被其他铁路公司所采用。列车时刻表标准化到格林尼治时间(GMT),到1855年,时间信号用电报从格林尼治传遍英国铁路网。然而,直到1880年,GMT作为全英统一标准时间的作用才在立法中确立。四年后,在美国华盛顿举行的国际子午线会议上,格林尼治时间被采纳作为全球时区的参考标准,而秒被正式定义为平太阳日的 $1/86400$ 。

原子钟是如何工作的

在铯原子钟里,微波源的频率一直被仔细调整到与铯原子基态两个超精细能级之间的能量差相对应的谐振频率(9192631770 Hz)上。原子吸收微波辐射,从吸收信号产生的反馈信号被用来保持微波源调谐到这个高准确度的特定频率。时间显示是通过对微波源的振荡进行电子学计数而产生的。

路易斯·埃森在NPL研制的最初的时钟使用一束热的铯原子,其准确度约为 1×10^{-10} 。如今,铯基准钟使用一种被称为“原子喷泉”的架构,在这种架构中,激光冷却的原子通过微波腔向上发射,然后在重力作用下回落。使用冷原子意味着相互作用的时间可能比热束钟长得多,从而提供更高的谱分辨率。经过仔细评估环境扰动引起的系统频移,如今最好的铯喷泉钟的准确度达到了 1×10^{-16} ,不过测量结果必须经过几天的平均时间才能达到这个水平。它们作为基准钟为国际原子时(TAI)做贡献。

多的时间间隔参考。埃森后来写道：“我们邀请了(NPL)主任来见证天文秒的死亡和原子时的诞生。”

但证明新标准的稳定度并不足以重新定义秒。新定义必须在测量不确定度的范围内与旧定义保持一致。埃森和帕里因此着手相对于皇家格林尼治天文台发布的天文时标来测量他们的铯标准的频率。

与此同时，天文学家转而使用基于地球绕太阳公转周期的历书时。他们的论据是，地球绕日公转比其自转更稳定，但可惜对于大多数实际测量目的来说，公转周期长得太不切实际了。然而，国际计量委员会跟随他们的引导，在1956年选择历书秒作为国际单位制中的时间基本单位。正如埃森所说：“就连科学机构也会做出荒谬的决定。”

但不管荒谬与否，仍需要将铯的频率与历书秒联系起来。他与美国海军天文台的威廉·马科维茨(William Markowitz)合作完成了这项工作。最后，在1967年的国际计量大会上决定，将秒重新定义为“铯133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应辐射的9192631770个周期”。

2 新一代技术

结构更紧凑、成本更低(尽管准确度低些)的铯原子钟被开发出来，应用也得到了蓬勃发展。也许我们并不总是意识得到，日常生活的许多重要方面其实都离不开精确的计时。移动电话、金融交易、互联网、电力和全球卫星导航系统都依赖于时间和频率标准。

不过，尽管铯原子的跃迁已被证明是秒定义的持久基础，铯原子钟现在可能正达到其准确度的极限，进一步改进可能会开辟新的应用领域。在这种形势下，基于光频跃迁而不是微波跃迁的新一代原子钟应运而生。这些新型时钟由于工作频率高得多而提高了精确度。在其他条件相同的情况下，原子钟的稳定度与其工作频率成正比，与电子跃迁谱线的线宽成反比。但在实际应用

中，稳定度还取决于原子吸收特征的信噪比。

在光学原子钟里，超稳定激光器被锁定于电磁波谱光频区域的窄谱电子跃迁，即所谓的“钟跃迁”上。目前正在研究的光钟可分为两类：一类是基于单个激光冷却的囚禁离子；另一类是基于囚禁在光学晶格中的激光冷却原子团。前者是射频电磁阱中的单个激光冷却离子，接近于无扰动环境中的一个静止吸收粒子的光谱学理想情形。囚禁的单个离子被冷却后，它可以被限制在一个尺度小于钟激光波长的空间区域内，这意味着吸收特征的多普勒展宽被消除了。

通过控制离子的剩余运动，确保它严格地限制于囚禁阱中心，也可以大大抑制其他系统频移。因此，这类时钟具有非常高准确度的潜力。缺点是单个离子产生的吸收信号信噪比不高，这限制了时钟能够获得的稳定度。

另一方面，中性原子可以被大量囚禁和冷却，从而产生信噪比高得多的信号。例如，在其他条件相同的情况下，稳定度随着原子数量的平方根而提高。研究人员现在可以将数千个激光冷却的原子囚禁在光学晶格阱中——最常见的是由相交激光束形成的一维势阱阵列。

人们可能认为，用来囚禁原子的光束会改变钟跃迁的频率。然而，这是可以避免的，只需将用于创建晶格的激光调谐到一个“魔术”波长，在那里钟跃迁上下能级的频移量完全相同——一

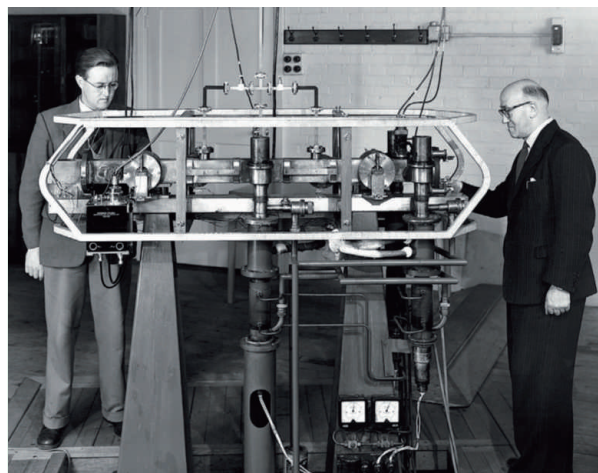


图1 埃森和帕里与他们研制的铯原子钟

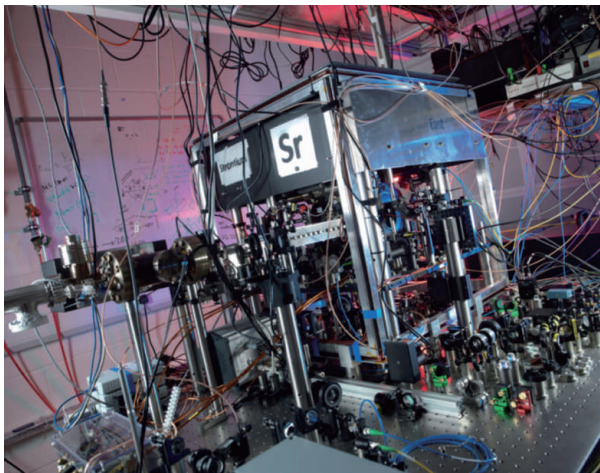


图2 新一代光钟

个解决方案在2001年由日本东京大学的香取秀俊(Hidetoshi Katori)首次提出。

目前,美国科罗拉多州博尔德国家标准与技术研究所安德鲁·勒德洛(Andrew Ludlow)领导的研究小组保持着光钟稳定度的记录。他们的镱光晶格钟最近结果表明在数千秒的平均时间内稳定度达 1×10^{-18} 。然而,囚禁离子光钟也表现出远优于铯原子钟的稳定度,两种类型光钟的系统不确定度评估现在都达到了 10^{-18} 级。这远远超过了铯频率基准的准确度,并提出了一个明显的问题:是时候再次重新定义秒了吗?

3 计时技术的未来

当然,为避免定义上的任何不连续性,需要用铯钟频率来准确地测定所选光学标准的频率。这个任务很容易用飞秒光学频率梳来完成。这种具有均匀频率间隔梳齿光谱的激光源,是连接光学频率和微波频率之间的桥梁。重新定义的一个障碍是,目前还不清楚到底哪种光钟最好。研究中的系统都各有优缺点——一些可提供更高的稳定度,而另一些更能避免环境扰动的影响。

另一个挑战是对不同实验室独立研制的光钟进行直接比对,通过实验验证它们评估的系统不确定度。在这方面,欧洲的研究人员有一个优势,因为已经可以使用光纤连接,将英国、法国和德国的光钟以必要的准确度水平进行比对。遗憾的是,这些技术目前不能跨洲使用,必须找到连接美国和日本光钟的替代方法。

远程时钟比对实验还必须考虑到时钟频率的引力红移。对于不确定度为 1×10^{-18} 的光钟,这意味着必须以相应约1 cm高差的准确度知道时钟所在位置的重力势,这是对目前技术水平的显著提高。重力势的潮汐变化也必须加以考虑。

尽管所有这些挑战假以时日均可克服,秒的重新定义要得到国际共识还有一段路要走。在那之前,全球时间频率计量学界已同意,光学原子钟原则上可以作为秒的次级定义对国际时标作出贡献。

事实上,光学原子钟前所未有的精确度已经让基础物理学受益。例如,通过比较数年中不同时钟的频率,为精细结构常数($\alpha \approx 1/137$)和质子—电子质量比现在的时间变化设置了更严格的上限。

光钟也可能开辟出全新的应用领域。通过比较可移动光钟与固定参考时钟的频率,我们将能够以高灵敏度、高时间和空间分辨率测量距离足够远位置之间的重力势差。这种测量方法将导致对海拔高度更加一致的定义——目前不同国家用不同的潮汐仪进行测量,而且地球上海平面并不处处相同。它们还可以让我们监测海平面的实时变化,追踪冰盖质量和整体海洋质量变化的季节性和长期趋势——这些数据为用于研究和预测气候变化影响的模型提供了关键输入。也许具有讽刺意味的是,借助最新的“篡位者”——光钟,我们将能够更详细地研究地球——秒的最初定义就来自它的自转。