

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205495

地球以外时间规则研究^{*}

刘 民¹ 帅 平² 平劲松³ 王乾娟¹

(1. 北京东方计量测试研究所 北京 100086; 2. 中国空间技术研究院 北京 100094;
3. 中国科学院国家天文台 北京 100101)

摘 要: 时间规则是为统一时间而制定的测量和计算时间的方法, 包含 3 个要素, 即约定的时间单位和约定的时间起点, 以及时间历法。现有的时间规则仅适用于地球及其引力势范围内, 不适用于地球以外的浩瀚宇宙空间。实现地球以外宇宙空间的时间统一是人类走向太空的必然要求。本文阐述时间规则的定义和内涵, 用广义相对性原理论证同时性仅存在于同一个坐标系内, 不同坐标系之间不存在同时性, 进而介绍了相对论中两种时间概念: 原时和坐标时, 用看似无穷远处的脉冲星来复现坐标时。比较两种时间统一的模式: “中心守时, 局域授时” 模式和 “局域原时, 全域坐标时” 模式。重点区分绝对时间观和相对时间观, 认为相对时间观是解决地球以外时间统一问题的关键, 再次运用相对时间观点解释时间规则的三要素, 进而推出空间守时系统的概念。

关键词: 时间规则; 广义相对论; 原时; 坐标时; 绝对时间观; 相对时间观; 空间守时系统

中图分类号: V41; TB9; P1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55; 160.1560; 590.1099

Study on the rule of time out of the Earth

Liu Min¹ Shuai Ping² Ping Jinsong³ Wang Qianjuan¹

(1. Beijing Orient Institute of Measurement and Test, Beijing 100086, China; 2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The rule of time is a way of measurement and calculation time in order to unify time, it includes three elements: appointed unit of time, conventional origin of time and time calendar. The existing rules of time only apply to the earth and inside range of its gravitational potential, and not to the vast space out of the earth. For human beings to go to the space, it is an inevitable requirement to unify the time of space out of the earth. Here describes the definition and connotation of the time rule, and applies principle of general relativity to prove that the synchronicity should be only happened in the same coordinate system, and that does not have simultaneity between different coordinate systems. And then two expressions of time in the general relativity, proper time and coordinate time, were introduced. Coordinate time can be reproduced by pulsar looked like from infinite far away. Two modes to unify time were compared that one mode is “center time-keeping, local time service”, and another mode is “local proper time, universal coordinate time”. The key point of this paper is to distinguish two kinds of viewpoint, absolute time view and relativity time view. And think that relative time viewpoint is the key to deal with the problem to unify time out of the earth. Three elements of time rules are explained by relativity time viewpoint again, and more, to put forward the concept of space time-keeping system.

Keywords: rule of time; general relativity; proper time; coordinate time; absolute time view; relativity time view; space time-keeping system

0 引言

在中国科协组织开展的“2021年重大前沿科学问题和工程技术难题”征集活动中,总共征集到472个问题和难题。由2万余名科技工作者和战略专家参与,经海选、初审、复审和终审,最终审定了10个前沿科学问题、10个工程技术难题和10个产业技术问题,并于7月28日在中国科协第23届年会上发布。其中,由中国宇航学会和中国计量测试学会联合推荐的“地球以外有统一的时间规则吗?”入选为10大前沿科学问题之一^[1]。国际天文联合会(International Astronomy Union, IAU)1991年以来的各次决议^[2],考虑了相对论效应,把地球标准时间外推到地球质心,再外推到太阳系质心。用户再把太阳系质心时间应用到空间点,进而继续用地球标准时间来统一整个太阳系的时间,IAU决议给基于地面观测的地球以外的时间统一提供了理论基础^[3]。例如,在地面观测脉冲星,换算脉冲到达坐标系原点的TCB时间。然而,这种做法在应用和实现上借助了地球大地水准面,对于广袤的太阳系空间活动而言鞭长莫及,授时不便,工程上不可实现。从严格意义讲,背离了广义相对性原理的平权思想。而本文提出的时间规则不限定观者在地球上。

时间的基础性不言而喻,在金融交易、电力调度、交通运输、电信运营、航天活动和国防建设等行业中,需要

更精准、更稳定的时间统一系统。现有的时间规则仅适用于地球及其附近空间,不适用于地球以外的浩瀚宇宙空间。今天,人类正在向太空阔步前行,探索宇宙奥秘,开发和利用太空资源,正在经历从信息化革命向航天产业化革命的转型。在太阳系行星探测和星际飞行任务中,以脉冲星辐射的X射线信号作为天然信标,是实现远离地球的航天器自主导航的有效途径(即脉冲星导航),而构建地球以外时间基准体系是脉冲星导航的前提条件^[4];月球基地、火星基地以及航天器之间的网络联系,也需要去中心化的时间计量和应用体制^[5]。时间规则是包含时间基准体系、时间计量和应用体制的更为广泛的概念。本文阐述时间规则的定义和内涵,应用爱因斯坦广义相对性原理区分相对时间观和绝对时间观,在广义相对论的原时和坐标时表达基础上,提出去中心化的“局域原时,全局坐标时”模式;最后,总结推理得出:地球以外的时间规则是以现有“地球以内”的时间规则为基础的,适用于更大范围、更精确、更稳定的时间规则,并基于此规则构建空间守时系统。

1 时间规则的定义和内涵

时间规则指为统一时间而制定的测量和计算时间的方法,也称为时间计量(time metrology)。时间规则有3个要素:两个约定和一个法则,如图1所示。

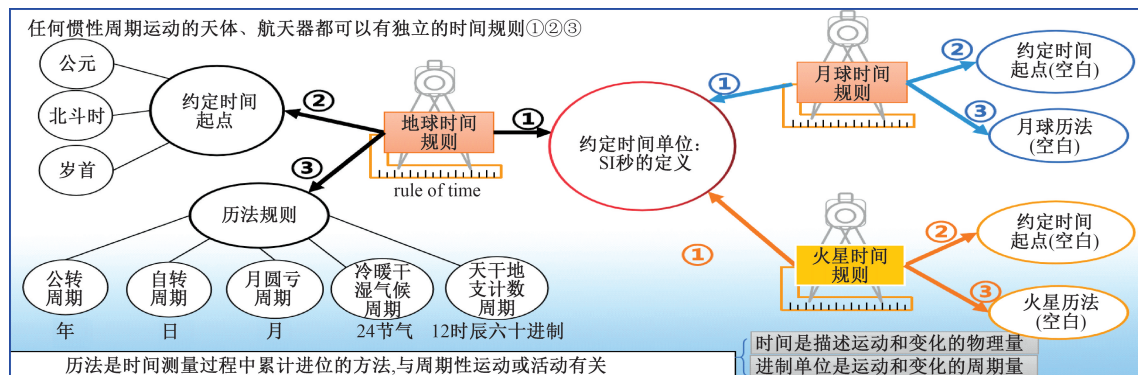


图1 时间规则的三要素:①单位②起点③历法

Fig. 1 Three elements of rules of time: ①unit, ②origin, ③calendar

第1个约定是时间单位,也称为秒长、时间尺度等,即表达时间间隔的基本尺度。在国际单位制(international system of unit, SI)中规定时间的单位是SI秒,在2018年第26届国际计量大会上,SI秒的最新定义为:“当铯频率 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$,即铯-133原子基态的超精细能级跃迁频率,以单位Hz(即 s^{-1} 表示时),将其固定数值取为9 192 631 770来定义秒”^[6]。在新SI的7个常数中,只有 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 是约定常数。约定 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 是依据1950年前后的观测数据,在地球公转周期的基础上得到铯原子钟频率。

SI秒一旦被定义为固定常数,时间单位实质上就变成了人类社会的一种约定^[7],不再来自天文观测数据,也不局限于地球范围。在此之前,是由天文学家来告诉我们,什么是最准的时间;此后,是由计量学家来共同复现和传递标准时间,并研究更准的光频标准。或许,将来还要再添加几个用来定义时间单位的约定常数。

第2个约定是时间起点,也称为参考时刻、初始历元,包含时间坐标轴的原点和历书中周期运动的起算或进位点,如岁首、日分界等的约定。现在普遍使用的农历

采用的时间起点与宗教有关,其他时间系统的起点都默认把公历作为参考标尺。例如,天文学上为了连续计算时间坐标,采用儒略日(Julian Day)为刻度的时间坐标轴,起点在公元前4713年1月1日中午12点。国际原子时(international atomic time,TAI)的起始点为公元1958年1月1日0 h 0 m 0 s。再如,公历的岁首定位1月1日,而不是春分点。举例中使用的日期,默认公历时间起点是耶稣诞生后第1个礼拜日,即为公元1年1月1日。

第3个要素是时间历法,历法是时间测量过程中时间单位累计进位的方法,用于描述自然现象的周期规律。在地球上以地球的自转周期(天)为基本表达,进一步用世界时即地球公转和自转周期变化,月亮圆缺和干湿冷暖的周期来规定历法。历法中闰秒、闰月、闰年都是为了协调非整数周期的自然现象,在时间坐标轴上使不同运动周期协调一致的进制方法。例如,闰年是地球公转与自转周期,闰月是地球公转与月亮圆缺(月球视运动)周期,闰秒是地球平均自转周期(天)与铯原子能级跃迁周期,两类时间周期之间的协调非整数周期进制的方法。闰秒的本质是^[8]世界时基本尺度(天)存在变化,与原子时(SI秒)不存在整周数倍数关系。

时间规则是以原子物理学、数学和天体运动周期为基础的约定,地球上的“年-月-日-时”历法单位,只能描述地球运动周期,不能照搬到其他天体;时间起点也不能照搬其他天体;唯一可以沿用的是时间单位秒的约定,这是不同天体之间时间统一的基础。那么,如何实现地球以外的时间统一呢?类似于地球,需要考虑不同天体的运动周期规律,同时还需要以广义相对论为理论基础构建新的时间规则。

2 广义相对论框架下的时间表达

国际天文联合会IAU1991年决议采用广义相对论框架,给出了球对称时空度规在固连于质心参考系中的Schwarzschild坐标系情况下的表达形式^[9]。其中,为了表达时间与空间的关系,出现了两种时间的概念:原时(也称固有时)和坐标时^[10]。在确定的空间坐标系内,不同位置上的原时各有不同,坐标时只有一个。

2.1 广义相对性原理

时间与空间不可分割,不存在离开空间而独立的绝对时间。这是相对论的基本观点,俗称时空观。爱因斯坦提出的广义相对性原理是支撑广义相对论的认知基础:“一切参考系都是平权的,物理定律在任何坐标系下形式都不变,即具有广义协变性”。若把每个人比喻成独立参考系的话,则每个人看自己都是正确的,且每个人看自己时所有物理规律都是一样。这就是所谓的平权。然而,当人们相互看对方时,却发现对方的时空由于受到相

对论效应作用而产生弯曲。因此,同时性仅存在于自己独立的坐标系内,不能跨越不同坐标系定义同时性^[11]。在太阳系的参考系中,可以把广义相对性原理当作是地球以外统一时间的指导原则。

在史瓦西度规下,原时和坐标时的关系可以表达为^[12]:

$$\Delta t = \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \Delta \tau} \left(1 + \frac{U}{c^2} + \frac{V^2}{2c^2} \right) d\tau \quad (1)$$

式中: t 为坐标时; τ 为原时; Δt 为坐标时轴上的时间间隔,也称为坐标时刻度,以SI秒为单位; $\Delta \tau$ 为原时轴上的时间间隔,以SI秒为单位; U 为时钟在 τ_0 时刻所处位置上的引力势; V 为时钟在 τ_0 时刻所处位置上相对于坐标系原点的线速度; c 为光速常数,以m/s为单位。 U 和 V 都是与时空坐标有关的参数,也称为轨道参数; t 和 τ 都绑定在时空坐标系上,由于轨道参数的影响,二者不能直接比较。因此,处于不同空间位置上的时钟,也不能直接比较。

2.2 原时

相对论中的原时是与事件同位置的物理时钟测量的唯一时间,也称为本地原时或固有时间,也有相对论文献中用标准钟来表达原时。原时是以SI秒为单位测量得到的时间,是一个客观的、真实的、可直接测量的物理量。

国际原子时是在大地水准面上用SI秒定义的方法测量得到的时间,即大地水准面原时,称之为TAI。那么,非大地水准面上的时钟测量的是什么时间呢?通常,这类时间有两种用法。一种是按SI秒定义的时间单位走时(测量本地原时),再根据时钟所处的地理位置参数,如海拔高度和引力势测量值等参数,用类似式(1)的公式,由原时 τ 转换为坐标时 t ,获得地球质心坐标时 t (TCG)。实际的计算公式会复杂一些,需要考虑潮汐引力场,再把坐标时 t (TCG)外推得到大地水准面的时间 t (即地球时,terrestrial time,TT),这种在大地水准面上复现SI秒的原子钟,用于复现本地原子时(atomic time,AT)。经过特别认定的原子钟组,可作为守时时钟把测量结果参与BIPM(international bureau of weights and measures)加权平均。另一种用法,由于处于非大地水准面上,又无法准确知道所处地理位置参数,为了统一时间,驯服于授时信号修正了时钟走速,保持与标准时间同步。这种时钟所测量的时间是标准时间的量值传递结果,但是放弃SI秒定义的时间单位,不符合“原时”的定义,不是本地原时。在授时技术的基础上,同步于标准时间,可实现地球及其附近范围的时间测量的量值统一。

2.3 坐标时

选定固连在质心上的坐标系,在起点或无穷远处,以SI秒为单位,测量得到的时间在相对论中称为坐标时。

这两个特殊位置上的引力势为0,相对于原点的线速度为0,因此相对论效应也为0。如式(1)中,若 $U=0$,且 $V=0$,则 $\Delta t=\Delta \tau$ 。从质心原点看出去,脉冲星相对于太阳系非常遥远,符合坐标时定义条件。稳定的毫秒脉冲星发出的脉冲信号可以作为太阳系质心坐标系的坐标时的参考^[13],进一步把脉冲星看作坐标原点上的那个时钟,用该时钟来复现坐标时。

坐标时与坐标系选择有关,是一个随坐标系变化的变量。但是在同一个坐标系内坐标时是全局量,从任何地方测量再经过换算获得的坐标时,其流逝速度都一样。不同质心坐标系上有不同的坐标时,地球质心坐标系上的坐标时是TCG(geocentric coordinate time),太阳系质心系的坐标时是TCB(barycentric coordinate time),火星质心坐标系的坐标时是什么?还有很多天体的质心坐标时没有定义。而这些天体要成为独立的局域守时系统就需要有自己的坐标时。

3 两种统一时间的模式

从古代的打更敲钟,到现代卫星授时,都属于第一种统一时间的模式“中心守时,局域授时”。然而地球以外,除了空间范围增加带来的远距离通信困难外,时空弯曲的相对论效应也变得非常显著,于是出现了第2种统一时间的模式“局域原时,全域坐标时”^[14]。后者更适用于不同局域参考系之间对统一时间的需求。

3.1 中心守时,局域授时

地球或附近轨道上采用“中心守时,局域授时”模式。在大地水准面附近有80多个守时实验室的400多台原子钟,按照国际单位制的定义复现SI秒,BIPM对各地报送的原子钟数据进行加权平均而得到TAI,再结合国际地球自转服务组织(International Earth Rotation Service, IERS)提供的世界时UT1(universal time),加入闰秒后,发布标准时间UTC(coordinated universal time),这称为中心守时。除了大地水准面上的时钟能按SI秒定义测量时间外,其他时钟放弃自己局域的原时,而保持与标准时间同步,也可认为是局域的时钟被授予标准时间,这称为局域授时。对于远离地球引力场的宇宙空间,复杂非线性的传输算法使得地球上的授时技术将不再简单地适用。首先,授时信号的传输需要时间,对于距离遥远的两个空间位置,信号传输时间的计算变得非常复杂、甚至只能在一定精度下近似计算。举例来说,火星距离地球最近5千5百万千米,最远4亿千米,从地球上发出的电磁波授时信号到达火星,单程旅行短则3 min,长则22 min,信号传输期间两者在轨道上的位置不断发生变化,延迟时间会不断变化。其次,与速度相关的多普勒效应和狭义相对论,造成时间间隔不均匀,要实现时间同步

非常困难,相对运动的两者的不能像地球上那样静止授时。最后,空间计量理论告诉我们^[15]:“同时性仅在同一个坐标系内有定义,不同坐标系之间没有同时性。”这种跨越不同坐标系之间的授时方法受相对论效应的影响很大。地球上的标准时间只能适用于地球坐标系,不能用在其他坐标系内,如月球坐标系、火星坐标系等。只有放弃“绝对”时间观点,才能跨越不同局域参考系来统一时间。

3.2 局域原时,全域坐标时

地球及其引力场范围内可作为一个局部固连在质心参考系上的坐标系,同一个坐标系内具有同时性,因此可用“守时-授时”模式统一时间。然而,不同坐标系之间没有同时性,若要跨越不同的参考系来统一时间,就必须运用广义相对性原理的平权思想,让各个局域参考系上拥有自己的时间规则,用人类共同约定的SI秒,用铯原子钟测量获得本地原时。平权的意思就是谁也不作为中心,参考系之间不存在标准时间和授时关系,各自拥有自己的时间起点和历法,此为“局域原时”。为统一各局域之间的时间,就需要通过科学而有效的手段链接各个局域,从而形成广域或全域。全域包含了所有局域,可用来统一各局域上的时间。无穷远处的脉冲星能替代坐标原点时钟的作用复现坐标时,脉冲星发出的电磁脉冲辐射进入太阳系的部分可视为平面电磁波,把脉冲星方位作为已知量,可将四维时空简化为二维时空^[16]。因此,通过脉冲星观测能够实现全域时间统一,此为“全域坐标时”。这就是“局域原时,全域坐标时”的空间守时系统模式,如图2所示。

4 两种时间观

本文所说的“绝对”时间观和相对时间观,仅适用于讨论统一时间的问题,两者都能指导时间的统一,只是适用范围不同。

4.1 绝对时间观

认为标准时间是唯一的,所有用时设备和时钟都可以通过授时信号同步到标准时间上的观点,称为“绝对”时间观。这是一种牛顿的自然科学哲学原理框架下经典哲学时空观的简单逻辑延伸。从“绝对”时间观来看,时间与参考系选择无关,不同惯性参考系中的静止钟对同一运动过程的时间测量结果相同。在地球上即使考虑了相对论效应,只有大地水准面上复现SI秒的时钟测量的时间为标准时间。从“绝对”时间观来看,时间与参考系选择无关,不同惯性参考系中的静止钟对同一运动过程的时间测量结果相同。其他时钟如果与标准时间不同步,就必须调整走速,改变时钟的时间尺度,如图3的下

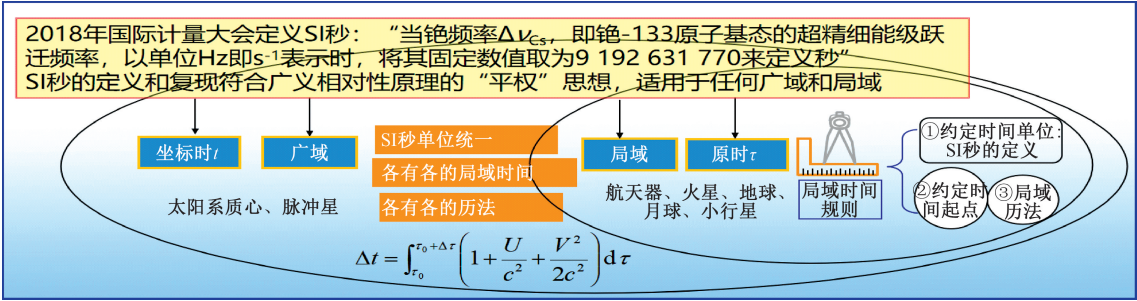


图 2 统一时间的第 2 种模式-空间守时系统模式

Fig. 2 The second mode of unifying time-space time-keeping system

半部分， τ' 采用非 SI 秒为单位。授时信号所达之处，标准时间坐标轴上的刻度都被认为是绝对均匀的。被授时信号驯服的时钟与标准时间的走速差，称之为钟差模型^[17]。若时间尺度与本地 SI 秒之间不一致，则称为时间尺度改正。这种差异包含相对论效应在内的诸多影响因素^[18]，从而式(1)可以改写为：

$$\Delta t = \Delta \tau' + \int_{\tau_0}^{\tau_0} \left(\frac{U}{c^2} + \frac{V^2}{2c^2} \right) d\tau' = \Delta \tau' [1 + o(c^{-2})]$$

(2)

式中： Δt 为标准时间轴上的时间间隔，也称为标准授时信号间隔，以 SI 秒为单位； $\Delta \tau'$ 为被授时信号驯服的时钟所测时间轴上的时间间隔，以非 SI 秒为单位； U 为时钟所处位置上的引力势； V 为时钟所处位置上相对于坐标系原点的线速度； c 为光速常数，以 m/s 为单位； $o(c^{-2})$ 为与 c^{-2} 有关的相对论效应项，当天体或航天器轨道呈圆形轨道时， U 和 V 就不随时间变化，相对论修正项 $o(c^{-2})$ 可视为常数。

全球卫星导航系统 (GNSS) 的天基时间系统在服务

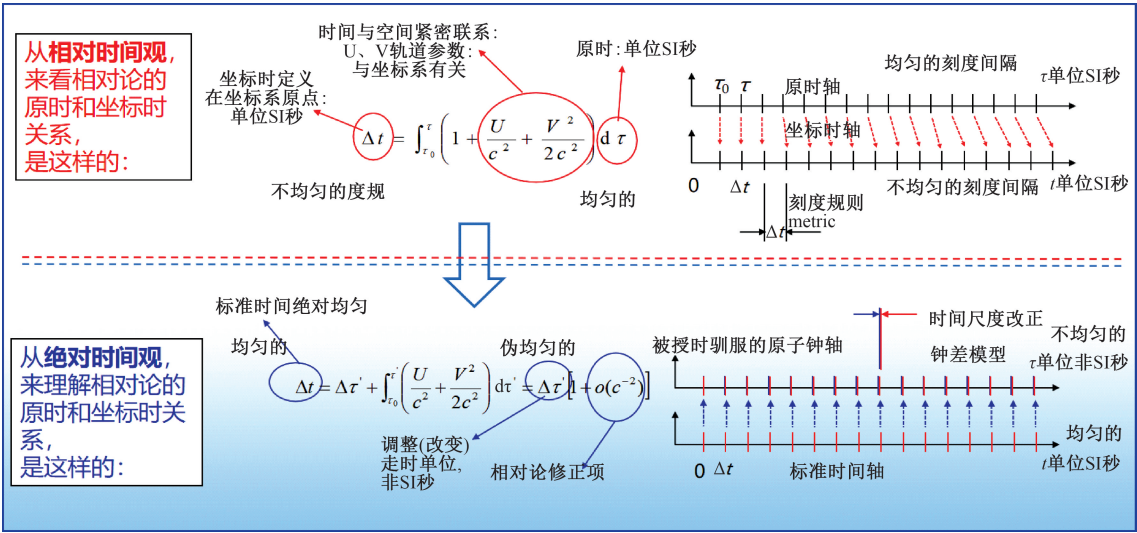


图 3 绝对时间观和相对时间观对时间均匀性的理解

Fig. 3 Time's scale is regarded as even or not from two viewpoints both absolute and relative

应用层面采用的就是典型的第 1 种时间统一模式，认同“绝对”时间观；星载时钟在圆轨道运动时相对论效应项是与轨道半径有关常数；不同轨道的时钟走速不一样，通过连续不断地授时都能保持与标准时间同步，实现地球质心坐标系上的时空统一^[19]。

4.2 相对时间观

相对时间观点源于时空相对性的基本原理，不能建立统一的的同时性，使得标准时间不具有唯一性。各局域相信自己的原时是均匀流逝的，不同局域参考系之间，相

互观测对方的所谓标准时间的授时信号不是均匀间隔，相互认为对方的时间坐标轴是不均匀的，体现了“平权”的思想。在式(1)两边各有两条时间坐标轴，坐标时 t 轴和原时 τ 轴，如图 3 上半部分，如果相信原时的时间轴刻度是均匀间隔，那么坐标时的时间轴刻度就不是均匀间隔的，反之亦然。受引力势和相对速度引起的相对论效应影响，坐标时轴上的度规(刻度规则)是空间位置和原时的变量，因此原时 τ 与坐标时 t 不能直接比较^[20]。不能说原时测量准确度高于坐标时，也不能说用原时的高准

确度测量,外推计算到坐标时也能获得高准确度。在时间“TAI(TT)→TCG→TCB”的坐标转换过程中,相对论效应影响量,如大地水准面引力势和地球质心在太阳系质心坐标系内的轨道参数都不是恒定的,而是周期性的变量。IAU 2009 定义的 L_G 和 L_B 常数是长期测量获得的相对稳定的平均值,不稳定因素除了短周期波动,如潮汐,还有更长的漂移。如果认同了 L_G 、 L_C 和 L_B 是不变的常数,那么 TCB 与 TAI(或 TT)的关系就是简单的线性关系,则 TCB 与地球上的标准时间绑定,所以 IAU 对 TCB 的定义是基于地球上的观者的。天体历表的时间索引由地球动力学时间(terrestrial dynamics time, TDT)转变为 TCB,仍然是大航海年代坐地观天的结果。我们讨论地球以外时间规则问题,已经超出了 IAU 所规定的时间索引的适用范围,要把观者从地球上搬移到其他局域,就必须研究如何用其他局域的本地原时为时间索引,重新构建轨道参数历表的方法。

相对时间观的本质源于广义相对性原理的平权思想,还源于时间与空间不可分离的基本认知,运用相对时间观再来分析时间规则的三要素,将会得到地球以外统一时间的规则。

首先,时间单位定义中没有空间约束,全域的坐标时和局域的原时都继续沿用 SI 秒的约定,这是统一时间的共同语言,但是所在空间点不同,测量时间的结果也不同,不能直接比较。原子钟复现的原时和脉冲星复现的坐标时哪个更准确的问题,在充分发挥毫秒脉冲星的脉冲周期长期稳定的优势和 SI 秒定义优势基础上,还必须把 U 和 V 时空变量的测量不确定度考虑进来,构建准确、稳定的空间守时系统,利用该系统的反馈机制处理稳定性问题。

其次,时间起点的选择或者定义也跟时空坐标系紧密相关。例如,世界时(UT)建立在地心地固坐标系(Earth-centered, Earth-fixed, ECEF)上;ECEF 是一个非惯性旋转的坐标系,时间起点是公元日历的起点,时间单位是天,每天以太阳直射伦敦格林尼治天文台时刻为参考点;可见,UT 的时间起点有特定的空间约束,UT 与 ECEF 坐标系和格林尼治天文台的日晷投影密切相关。再如,TAI 是建立在地球惯性坐标系(Earth centered inertial, ECI)上,在大地水准面上复现 SI 秒,时间起点是 1958 年 1 月 1 日 0 h 0 m 0 s;一旦定义了起点,TAI 时间轴就与 UT 时间轴分道扬镳了,TAI 的时间坐标轴连续累计 SI 秒;可见 TAI 的时间起点也有空间约束,TAI 与 ECI 和大地水准面密切相关。

为统一太阳系内的时间,选择太阳系质心坐标系原点 O_{SSB} 为参考点。空间坐标的原点 O_{SSB} 位置公认,既然脉冲星能复现坐标时^[15],把脉冲星的脉冲编号为 0 的脉冲到达坐标原点 O_{SSB} 的时刻约定为初始历元,就成为广

域空间中时间规则的第 2 个约定。各个方向上的脉冲星赋予各自脉冲从 0 开始的序号,都把整数序号对齐初始历元,太阳系内在各个方向都将出现用序号间隔的刻度尺。脉冲编号(或序号) n 是连续且唯一的,每个局域上的时钟,先知道自己的轨道参数,再测量出脉冲到达本地的原时 τ 和序号 n ,就能进一步计算出序号 n 的脉冲掠过 O_{SSB} 的坐标时 t_{nSSB} 。不同局域守时系统都应该计算出相同的结果,即脉冲序号 n 和 t_{nSSB} ,时间索引是 TCB,虽然 TCB 的坐标时起始点已经被 IAU 规定了,但是脉冲星的初始历元尚未约定,这就是构建空间守时系统最大的难点。

最后,相对时间观突破了时间历法的局限,提出时间历法是自然规律的周期性的描述。地球上的“年-月-日-时”只能适用于地球,其他天体应有各自的时间历法。保持惯性运动的天体或航天器,其轨道参数(位置、速度和引力势)都是周期性的。这种周期应该是以本地时间为索引的。在式(1)中的 U 和 V 轨道参数可查历表获得,历表的时间索引是本地原时。目前天体历表时间索引一般为 TDB,也有 TCB 索引的,这些都与大地水准面上的时间保持线性关系,不属于天体本地原时,不符合相对时间观。

4.3 两种时间观点的比较

为了进一步理解两种时间观点,梳理了对照表如表 1 所示。

表 1 绝对时间观与相对时间观的比较
Table 1 1 Compare between absolute and relative time view

对照角度	绝对时间观	相对时间观
对标准时间的理解	标准时间是唯一的。	标准时间不是唯一的,每个坐标系都有自己的原时和坐标时。
统一时间的方法	用授时技术让用户时钟与标准时间同步。	用脉冲星复现坐标时来统一时间,而测量脉冲星需要原时和 SI 秒。
相对论效应的修正系数	相对论效应的影响可用类似 L_C 、 L_G 、 L_B 的常数值来修正。	相对论效应影响体现在原时与坐标时转换过程中的轨道参数, L_C 、 L_G 、 L_B 常数仅仅适用于地球轨道。
对时间均匀性的理解	仅在大地水准面上复现 SI 秒,产生标准时间。标准时间在各处都是均匀流逝的。	原时和坐标时都以 SI 秒为单位,观者用 SI 秒测量自己的时间是均匀流逝的,测量别人发过来的授时信号是不均匀的。
历表的时间索引	行星和航天器轨道参数历表时间索引是 TDB 或 TCB。	行星和航天器轨道参数历表的时间索引是本地原时,即在本地上用 SI 秒测量的时间。
对同时性的理解	时间与空间可以分离,授时技术能同步不同位置上的时钟。	时间与空间不可分离,同时性仅在同一个坐标系内有定义,不同坐标系之间没有同时性。

5 结 论

地球以外需要一种新的时间规则。对于整个太阳系来说,为了跨越不同局域参考系,在广域上建立统一时间的规则,必须运用相对时间观。空间守时系统是用铯原子钟测量本地原时,用脉冲星测量坐标时,用太阳系质心坐标系原点上的坐标时来统一时间的测量系统。地球以外的时间规则是以现有“地球以内”的时间规则为基础的,适用于更大范围、更精确、更稳定的时间规则,并基于此规则构建空间守时系统。新旧关系是继承与发展的关系,而不是对立与排斥的关系。空间守时系统具有重大的科学意义和工程价值,必将引领时间规则的新变革。

参考文献

- [1] 中国科学技术学会. 2021 重大科学问题、工程技术难题和产业技术问题汇编[M]. 北京:中国科学技术出版社,2021.
China Association for Science and Technology (CAST), Collection of Major Cutting-edge Scientific Issues and Engineering Technical Problems in 2021[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2021.
- [2] LUZUM B, CAPITAIN N, FIENGA A, et al. The IAU 2009 system of astronomical constants: the report of the IAU working group on numerical standards for Fundamental Astronomy[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2011, 110(4): 293-304.
- [3] 刘佳成,朱紫. 2000 年以来国际天文学联合会 (IAU) 关于基本天文学的决议及其应用[J]. *天文学进展*, 2012,30(4):411-437.
LIU J CH, ZHU Z., Explanation and implementation of the IAU 2000/2006 resolutions on fundamental astronomy[J]. *Progress in Astronomy*, 2012,30(4): 411-437.
- [4] PING SH. Understanding Pulsars and Space Navigations[M]. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd,2021.
- [5] 中国宇航学会/中国计量测试学会, 面向未来的科技: 2021 重大科学问题、工程技术难题和产业技术问题解读[M]. 北京:中国科学技术出版社,2021.
Focusing on the Future of Science and Technology- Interpretation of Major Cutting-edge Scientific Issues and Engineering Technical Problems in 2021[M]. Beijing: China Science and Technology Press,2021.
- [6] Unit of time, SI Brochure: The International System of Units (SI). [EB/OL]. <https://physics.nist.gov/cuu/Units/current.html>, <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure>.
- [7] 刘民,孙毅. 国际单位制的基本常数综述[J]. 电子测

量与仪器学报,2021,35(1):1-9.

LIU M, SUN Y, Review of elementary constants in international system of units[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021,35(1):1-9.

- [8] 刘民,孙毅,古兆兵,等. 2020 年再议协调世界时 UTC 闰秒问题[J]. *时间频率学报*, 2021,44(3): 153-162.
LIU M, SUN Y, GU ZH B, et al. Re-discussed about leap second in coordinate universal time in 2020[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2021,44(3): 153-162.
- [9] 潘炼德. 最新规范的参考系及有关问题[J]. *陕西天文台台刊*,2002,25(2):131-140.
PAN L D, The updated conventional references and related issues[J]. *CSAO Publications*, 2002, 25(2): 131-140.
- [10] VALENTE M B. Proper time and the clock hypothesis in the theory of relativity[J]. *European Journal for Philosophy of Science*, 2016, 6(2): 191-207.
- [11] 赵峥,刘文彪. 广义相对论基础[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
ZHAO ZH, LIU W B. Theory of General Relativity[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2010.
- [12] 张科,薛舜,吕梅柏. 地球范围内相对论效应下的时间转移与同步[J]. *电子与信息学报*, 2014,36(8): 1992-1998. ZHANG K, XUE SH, LYU M B. Relativistic time transfer and synchronization in the vicinity of the earth[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(8):1992-1998.
- [13] STOVALL K, ALLEN B, BOGDANOV S, et al, Timing of five PALFA-discovered millisecond pulsars[J]. *Astrophysical Journal*, 2016, 833(2):192.
- [14] 刘民,王乾娟,李军. 空间守时系统概念研究[J]. *电子测量与仪器学报*,2021,35(4):1-6.
LIU M, WANG Q J, LI J, Study on the concept of space time keeping system[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021,35(4):1-6.
- [15] 刘民,彭明,刘碧野. 空间计量中的时间单位和时间测量[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(8): 1137-1143.
LIU M, PENG M, LIU B Y. Time unit and time measurement in space metrology[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(8):1137-1143.
- [16] 帅平. 脉冲星:宇宙航行的灯塔[M]. 北京:国防工业出版社,2016.
SHUAI P. Pulsars: The Lighthouses for Space Flight[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [17] 张京宁,闫建华,崔煜. 卫星导航定位系统中监测站

URE 解算研究[J]. 导航定位学报, 2016, 4(2): 98-101.

ZHANG J N, YAN J H, CUI Y. Research of calculating station URE of satellite navigation system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2016, 4(2): 98-101.

- [18] 刘丽丽, 王跃科, 陈建云, 等. 导航星座自主时间基准的相对论效应[J]. 宇航学报, 2015, 36(4): 470-476.

LIU L L, WANG Y K, CHEN J Y, et al. Effects of relativity in autonomous time reference for navigation constellation[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(4): 470-476.

- [19] 刘民, 帅平, 刘志宏, 等. 空间计量与脉冲星导航[J]. 宇航计测技术, 2019, 39(1): 5-11.

LIU M, SHUAI P, LIU ZH H, et al. Space metrology and pulsars navigation [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2019, 39(1): 5-11.

- [20] 潘军洋, 谢懿. 火星任务中星上原时 τ 与TCG的相对论变换[J]. 深空探测学报, 2015, 2(1): 69-75.

PAN J Y, XIE Y. Relativistic transformation between the proper time τ and TCG for Mars missions[J]. Journal of Deep Space Exploration[J]. 2015, 2, (1): 69-75.

作者简介



刘民, 1991 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 1994 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2008 年于中国空间技术研究院获得博士学位, 现为北京东方计量测试研究所总师, 中国航天科技集团有限公司学术技术带头人, 国际无线电科学联盟 URSI

中国委员会电磁计量专业委员会 commission A 主席, 主要研究方向为空间计量、电磁学计量、时间频率计量、静电防护。

E-mail: liumin@cast514.com

Liu Min received his B. Sc. degree from Harbin industry of University (HIT) in 1991, M. Sc. degree from HIT in 1994 and Ph. D. degree from Chinese Academy of Space Technology (CAST) in 2008, respectively. Now he is a chief engineer in Beijing Orient Institute of Metrology and Test (BOIMT), Local Chairmen of Commission A in the Union of Radio Science International (URSI) in China. His main research interests include space metrology, electric-magnetic metrology, time and frequency metrology, and electrostatic protection, etc.



帅平, 1991 年于武汉大学获得学士学位, 1998 年于中国地震局地震研究所获硕士学位, 2003 年于中国航天科工集团获得博士学位, 现为中国空间技术研究院钱学森实验室的总师、研究员、博士、博士生导师, 主要从事卫星导航、脉冲星导航系统技术研究。

Shuai Ping received his B. Sc. degree from Wuhan University in 1991, M. Sc. degree from Seismological Institute of Chinese Seismology Bureau in 1998, and Ph. D. degree from China Aerospace Science & Industry Corporation in 2003, respectively. Now he is a chief researcher, and Ph. D. supervisor, in Qian Xuesen Laboratory of China Academy of Space Technology (CAST). His main research interests include satellite navigation and system technology for pulsar navigation.



平劲松, 1990 年于北京师范大学获得学士学位, 1993 年于中国科学院上海天文台获得硕士学位, 1996 年于中国科学院上海天文台获得博士学位, 现为中国科学院国家天文台研究员, 主要研究方向为射电天文学、天体测量和时空基准。

E-mail: jsping@bao.ac.cn

Ping Jinsong received his B. Sc. degree from Beijing Normal University in 1990, M. Sc. degree from Shanghai Astronomical Observatory of CAS in 1993 and Ph. D. degree from Shanghai Astronomical Observatory of CAS in 1996, respectively. Now he is a researcher in National Astronomical Observatories of CAS. His main research interests include radio astronomy and celestial reference frame and time & frequency standard.



王乾娟, 2006 年于北京交通大学获得学士学位, 2008 年于北京交通大学获得硕士学位, 现为北京东方计量测试研究所高级工程师, 计量事业部副部长, 主要研究方向为空间计量、电磁学计量、时间频率计量。

E-mail: Wangqianjuan@cast514.com

Wang Qianjuan received the B. Sc. degree and M. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2006 and 2008 respectively. Now she is a senior engineer in Beijing Orient Institute of Metrology and Test (BOIMT), vice director of the department of Metrology. Her main research interests include space metrology, electric-magnetic metrology, time and frequency metrology.