



论文

专题名称

地球以外的时间规则-以月球守时和授时为例

刘民^①, 余和真^{①*}, 金洪波^②, 平劲松^②, 李文潇^②, 王永军^③,曹周键^④, 张文昭^{②④}, 邵明学^{②⑤}, 杨捷^⑥, 鄢建国^⑦

① 北京东方计量测试研究所, 北京 100094;

② 中国科学院, 国家天文台, 北京 100101;

③ 兰州空间技术物理研究所, 真空技术与物理全国重点实验室, 兰州 730000.

④ 北京师范大学, 物理与天文学院, 北京 100091;

⑤ 中国科学院, 电工研究所, 北京 100190;

⑥ 兰州大学 兰州理论物理中心, 甘肃省理论物理重点实验室, 量子理论及应用基础教育部重点实验室, 兰州 730000;

⑦ 武汉大学, 测绘遥感信息工程全国重点实验室, 武汉 430070

* 余和真, E-mail: yuhezhen0556@163.com

收稿日期: 2025-8-2; 接受日期: 2025-x-x

中国空间技术研究院 2024 年度院士课题资助项目(课题编号 030010006420240017). 国家重点研发计划资助(课题编号 2022YFC2204101). 中国科学院攻坚专项行星历表方向项目(GJ030203), 理论物理专款兰州理论物理中心(Grant No. 12247101), 国防军工计量重点研发计划(编号 2026-xxxx), 国家计量技术规范 2025 年计划(编号 MTC45-2025-004)资助.

摘要 如何统一地球以外的时间, 从相对时间的观点出发, 运用相对论的原时和坐标时这两个时间概念, 把时间和空间结合在一起。分析了国际天文联合会决议公式中的同时性补偿项的物理意义, 图解补偿项中蕴含的子午面等价同时面的投影关系。月球质心坐标系有三种不同的形式, 它们坐标轴指向不同, 旋转运动也不同, 只有在费雷内坐标系中才会有对称和守恒的物理定律, 才会有简单的转换系数联系原时和坐标时, 我们把月球标准时间定义在费雷内坐标系的原点, 而非某个等势面, 只有原点上的坐标时是公认且唯一的。让多个守时装置测量各自的局域原时, 将原时换算为坐标时, 两两比对原点处的坐标时, 保存钟差的二维数据表, 检查钟差变化率最大者, 调节其坐标时转换系数, 选出偏离平均值最大的守时装置, 调节守时装置的历表, 钟差收敛到限定区间, 即可约定坐标原点, 实现坐标时的统一。其基本原理有三个: 1) 溯源性; 2) 四维时空同时性; 3) 约定性。

关键词 时间规则, 时间计量, 去中心化, 守时装置, 坐标时, 时空同时性, 空间计量

PACS: 04.20.Cv, 95.10.Jk, 06.30.Ft, 04.80.Cc, 95.75.Pq

引用格式: 刘民, 余和真, 金洪波, 等. 地球以外的时间规则-以月球守时和授时为例. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55(4): 123456
Liu M, Yu H Z, Jin H B, et al. The Rule of time Outside The Earth- as example of the time keeping and time service on the Moon (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55(x): 123456, doi: 10.1360/SSPMA2025-00000

1 引言

“地球以外有统一的时间规则吗?”是中国科协 2021 年度的重大科学问题^[1]. 未来的月球基地、火星基地、木星卫星、土星卫星、小行星等, 以及深空航天任务都离不开精准的时间测量, 然而时间标准如何定义? 如何统一时间? 等问题, 仍是天文学、计量学、深空科学领域共同面临的难题. “动钟变慢, 弱引力势钟快”的相对论效应造成不同运动状态和位置的原子钟走速各不相同, 远距离播发的标准时间的授时信号面临着相对运动多普勒效应、介质延迟和路径弯曲等的影响, 于是, 地球上的标准时间不适用于地球以外的广域范围^[2]. 空间计量是一门解决地球以外物理量测量溯源性问题的新兴专业, 其中研究时间统一问题正是空间计量的特色专业之一, 统一的时间是全人类共同的语言, 更是科学、技术和工程的基石, 运用广义相对论研究“守时-授时”时间规则, 对发展空间计量理论^[3]具有深远的指导意义.

其典型案例如月球, 随着月球探测活动的深入及未来月球基地建设的推进, 建立统一的月球时间计量体系, 给月球定位、导航、授时(PNT)提供时空基准, 已成为国际航天领域的亟待解决的科学、技术和工程问题. 2024 年 4 月, 美国白宫发布了一份备忘录, 指示 NASA 与其他政府部门合作, 在 2026 年底前制定“月球坐标时”标准^[4]. 当前月球尚未形成独立的时间规则, 直接沿用地球时间计量体系存在相对论效应、授时信号延迟及天体运动周期差异等根本性矛盾. 月球时间将比地球时间快约 $58.7\mu\text{s/d}$. 国际天文联合会(IAU)及国际计量局 BIPM 月球时间工作组, 基于广义相对论研究已提出月球坐标时(TCL)与地球坐标时(TCG)的转换模型, 月球应有自己的时间尺度. 美国学者 Kopeikin 和 Kaplan^[5] 在国际天文联合会 IAU2000 决议的基础上, 推导出月球坐标时(TCL)与地球坐标时(TCG)之间的换算公式; 另一些美国学者 Ashby 和 Patla^[6], 用爱因斯坦场方程的史瓦西度规, 借助地月质心坐标系的微分线元表达公式, 推导出月球表面原时(LT)到地球大地水准面时间(TT)的转换公式, 两篇论文虽然依据原理不同, 推导过程不同, 但他们给出的结论是基本相同的: “使用国际计量单位制 SI 秒复现原时的时钟, 月球时钟比地球时钟

走速快”月球上应有独立的守时系统. 然而, 他们的研究仅限于地月之间的差异, 没有提及多个守时装置之间如何统一时间的问题.

计量学面临的终极问题是“哪个更准确?”为此计量学指出了两条解决路径, 其一是溯源性路径, 哪个测量结果更能靠近物理单位定义的溯源源头, 则哪个更准确. 溯源是一种比对过程, 通过一串有不确定度的比对链, 把测量结果与物理量定义联系在一起称为溯源. 第 26 届国际计量大会通过了新的国际单位制, 重新定义了 7 个基本物理常数, 这些常数就是溯源的源头^[7]. 其中铯原子频率常数是时间单位 SI 秒的溯源源头. 其二是约定路径, 如果新的物理量出现时, 尚没有相关计量标准和基准, 也没有溯源链时, 或者不方便溯源时, 就需要用约定的方式实现测量单位的统一, 选出稳定的公共的参考量, 定义公认的测量方法, 约定也可实现计量的目标. 空间计量在地球以外统一测量单位将面临许多约定基准的问题, 如约定脉冲星的周期, 约定坐标系的原点等等. 本文提出的去中心化的守时方法, 就是充分运用了计量学的溯源性和约定性的原理.

2 地球以外的时间规则

2.1 时间规则与相对时间观

时间规则是为统一时间而制定的测量和计算时间的方法, 这个方法一旦被约定或法定之后, 就成为时间计量, 然而, 在地球以外, 至今还没有建立计量管理体系, 也没有约定月球、火星、以及其它天体的时间规则. 时间规则有三个要素, 分别是: 1) 时间单位; 2) 时间起点; 3) 历法. 其中时间单位被 SI 秒规定, 适用于所有广域和局域. 不同天体上均应使用 SI 秒复现本地的时间, 再用秒累计测量时间, 再结合本地历法就能够构建各天体自己的时间规则.

把爱因斯坦的广义相对论应用到时间计量领域产生了相对时间观, 与绝对时间观不同的是, 相对时间观认为:

1. 标准时间不是唯一的. 广义相对论中有两种时间概念, 原时和坐标时, 地球上标准时间转换到月球不能够作为月球的标准时间;
2. 统一时间是相对的. 不存在绝对统一的时间, 只能在各自的观测者群内实现局域的时间统一.

群与群之间需要通过包含两群的更广域的空间来统一他们, 时间能否统一取决于各个观测者群的划分.

3. 坐标时是相对的. 在分层嵌套的空间结构中, 每一层坐标系都有各自的坐标时, 下层级的坐标时, 在上层级被视为局域的原时. 地月系统绕太阳系质心旋转, 地月系的坐标时在太阳系质心坐标系内被视为本地原时, 而在月球看来它属于坐标时.
4. 时间和空间不和分割. 同时性是相对的, 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. 月球和地球分属于两个独立的坐标系, 因此同时性各自定义不同.
5. 本地原时是均匀的. 不同坐标系之间相对观测对方的时间是不均匀的. 地球的标准时间发送到月球, 月球上的观测者用自己的原时做参考, 就会发现地球的时间不均匀, 反之亦然.

2.2 空间守时系统简介

现有的大地水准面上的守时技术属于中心化的守时技术, 也不适用于地球以外的其他天体. 空间守时系统是建立在太阳系质心坐标系上, 用 SI 秒测量原时, 用脉冲星测量坐标时, 用坐标时统一全域时间的测量系统^[8]. 脉冲星对于太阳系非常遥远, 具有方位角稳定、脉冲轮廓稳定和脉冲周期稳定的特点, 脉冲星作为各个局域之间的自然基准, 比如地月质心坐标系与火星坐标系之间等, 空间守时系统给出了在各个局域之上基于脉冲星的脉冲序号规则来统一时间的方法^[9]. 各个局域内部, 除了使用空间守时系统外, 还可以使用四维时空的同时性原理, 用约定的方法, 实现本地时间的统一.

2.3 局域内部的物理规律

爱因斯坦的广义相对性原理是创建广义相对论之前的前提假设, 可视为公理. 爱因斯坦认为物理规律在本地的局域的坐标系内具有一致不变的形式, 而不同局域坐标系之间是平权的, 上层和下层坐标系之间也是平权的, 所谓平权是指各坐标系有属于自己的溯源链, 不同坐标系之间不存在溯源关系, 跨越不同坐标系的测量和比对, 违反平权思想, 其测量结果将会受到相对论效应的影响. 例如月球坐标系都有自己的标准时间, 不能把地球的标准时间授时

给月球, 强制月球使用地球的标准时间就违反了平权思想. 所谓物理规律一般是指诺特定律和守恒定律, 只有本地坐标系具有平权性和独立性时, 这些物理定律才能在本地产成立, 否则就不成立. 然而, 当我们把月球质心坐标系的参考方向指向遥远的星体时, 就违反了平权的思想. 守恒定律就会出现偏差, 周期性受到影响. 所谓潮汐引力也是跨越不同坐标的作用, 破坏了平权思想. 为了让物理规律在本地产成立, 就必须在本地产坐标系中排除其它坐标系的影响, 尤其是坐标系参考方向的选择.

3 同时性的定义

3.1 局域内同时性定义

假设 A、B 两个时钟, 它们在同一个坐标系内相对静止, 在 A 与 B 比对时间的过程中, 建立了同时线, 如图 1 中的 A 钟在世界线 a_1 点发送光波信息给 B 钟, B 钟在世界线 b_0 点收到信息, 同时, 反射光波信息给 A 钟, A 钟在世界线 a_2 点收到 B 反射的信息, 则令两时钟读数相等 $\tau(a_0)=\tau(b_0)$, 定义同时性为^[10]:

$$\tau(a_0) = \frac{\tau(a_2) + \tau(a_1)}{2} \equiv \tau(b_0) \quad (1)$$

式中: a_0, a_1, a_2 ---为 A 钟世界线上的点; b_0 ---为 B 钟世界线上的点; $\tau(\cdot)$ ---为时钟在世界线上某点的读数.

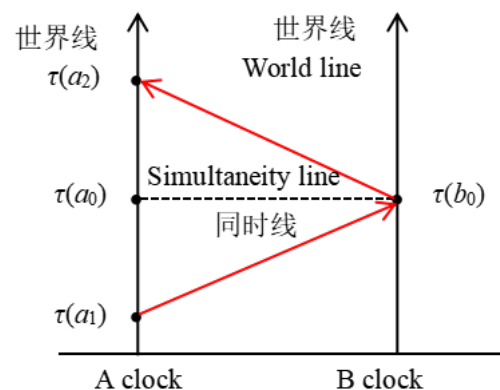


图 1 相对静止的 A、B 时钟定义同时性.

Figure 1 Defining simultaneity using relatively stationary clocks A and B.

检验同时性的方法是, 如果有 A,B,C 三个及以上

的时钟, A 与 B 调成同时, 然后 B 与 C 调成同时, 那么经过一段时间后 A 与 C 也是同时的, 这系统具有同时性.

3.2 IAU2000 决议中的同时性补偿项

在同时性定义中存在一个假设, 即“光速各向同性”, 进而推出“空间与时间能够相互转换”, 于是当知道 A 与 B 钟的空间距离, 假设为 d_{AB} , 就可以由 A 钟推算 B 钟的同时线.

$$\tau(b_0) = \tau(a_1) + \frac{d_{AB}}{c} \quad (2)$$

式中: c ---为真空中的光速.

IAU2000 决议 B1.3 的坐标时转换公式, TCB-TCG, (TCG 是地球质心坐标时, TCB 是太阳系质心坐标时), 有一个项与同时性有关, 即观测者的位置 x (BCRS, Barycenter Celestial Reference System 太阳系质心坐标系中的坐标), 与地球运动速度 v_E 的点积, 见式(3)中第 1 个方括号中的第二项, $v_E \cdot r_E$, 该项参与到地球坐标时的计算中, 并不是由广义相对论推导产生的, 其物理意义是补偿空间延迟的同时性, 类似于上面公式(2)的第二项. B1.3 决议表述如下^[11].

“对于运动学上无旋转的坐标系 GCRS ($T=TCG$, $t=TCB$, $r_E^i \equiv x^i - x_E^i(t)$ 且隐含了相等指标 i 从 1 到 3 的总和):

$$T = t - \frac{1}{c^2} [A(t) + v_E^i r_E^i] + \frac{1}{c^4} [B(t) + B^i(t) r_E^i + B^{ij}(t) r_E^i r_E^j + C(t, x)] + O(c^{-5}) \quad (3)$$

式中: $\frac{d}{dt} A(t) = \frac{1}{2} v_E^2 + w_{ext}(x_E)$, 本文省略 $B(\cdot)$ 和 $C(\cdot)$ 细节说明: 这里 x_E^i, v_E^i 是地球质心在 BCRS 坐标系中的位置、速度.” 指标 i 重复代表求和,

$v_E^i r_E^i = v_E^1 r_E^1 + v_E^2 r_E^2 + v_E^3 r_E^3 = \vec{v}_E \cdot \vec{r}_E$, 点积的投影关系表示时空延迟补偿, 画在图 2 中.

图 2 中地球在太阳系质心坐标系 BCRS 中运动, 其速度 v_E 方向沿轨道切向, 垂直于速度矢量且过质心的平面为子午面, 在公式 (3) 中定义一个同时面为子午面, 从 BCRS 原点的观测者观察, 在子午面上的任意位置 x 的观测者, 与地球质心的观测者 x_E 具

有同时性, $\vec{v}_E \cdot \vec{r}_E = 0$. 然而, 离开子午面的任意位置 $r_E = x - x_E$, 投影到子午面的距离为 $d = (\vec{v}_E \cdot \vec{r}_E) / |\vec{v}_E|$. 位置 x 上的观测者所测量的时间, 需要经过两类延迟才能等价于 BCRS 原点的时间, 第一类是距离 d 的延迟 $\Delta t_1 = d/c$; 第二类是 GCRS 原点到 BCRS 原点路径延迟 $\Delta t_2 = R_E/c$, 延迟 Δt_2 期间同时面变化角度 $\Delta\theta$, 假设 GCRS 在 BCRS 做圆周运动轨道角速度为 ω , 则 $\Delta\theta = \omega \Delta t_2 = \omega R_E/c = v_E/c$, 综合两类延迟获得同时性补偿项 Δt :

$$\Delta t = \Delta\theta \Delta t_1 = \omega \Delta t_2 \frac{d}{c} = \frac{\omega R_E}{c} \cdot \frac{(\vec{v}_E / |\vec{v}_E|) \cdot \vec{r}_E}{c} = \frac{\vec{v}_E \cdot \vec{r}_E}{c^2} \quad (4)$$

文献[5]中的 TCG-TCB 转换公式和 TCL-TCG 转换公式中也有同时性补偿项, 源于 IAU2000 的坐标时转换公式, 把位于 BCRS 原点的观测者的坐标时 t 作为溯源源头, 那么, 非原点位置的其他观测者, 均需要把所测量的时间归算到 BCRS 坐标原点, 于是增加同时性补偿项 Δt , 公式(4)可见, 月球绕地球公转的过程中, 每月要两次经过同时面, 文献[5]计算的同時性补偿最大值为 $\pm 127 \mu s$.

在研究坐标时转换的文献中, 均假设观测者位于局域的坐标原点, 进而让同时性补偿为零, 回避了周期运动的空间延迟补偿.

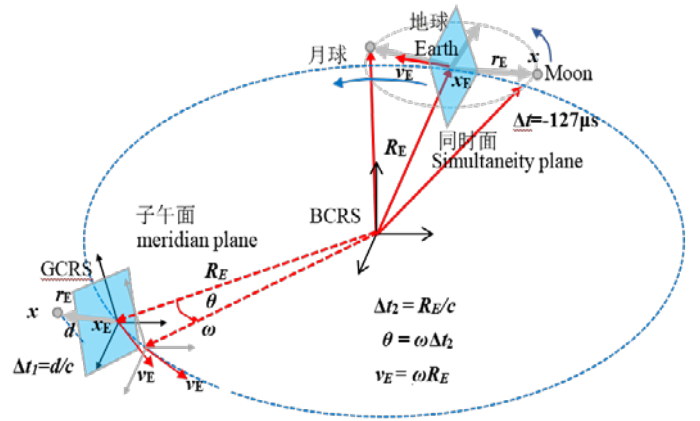


图 2 共时性补偿项的空间分解与路径延时.

Figure 2 Spatial Decomposition and Path Delay of the Synchronicity Compensation Term Explanation.

3.3 4 维时空基准的同时性原理

把上面的同时性定义扩展到 4 维时空, 与当前全球卫星导航系统的工作原理基本相同, 只是时间基准的溯源源头不一样. 用空间计量专业的观点, 我们

需要定义时空基准, 找到溯源源头, 谁是个稳定不变的时间基准呢? 例如, 图 3 中有 4 颗卫星在各自轨道上运行, 各卫星不间断地播发自己的 4 维坐标 (R_i, t_{xi}) , 其中 R_i 是第 i 颗卫星的 3 维空间位置, t_{xi} 是卫星在该位置上的时钟读数. 理想情况下, 4 维坐标 (R_i, t_{xi}) 信息 (以下简称“时间戳”) 按光速传播到坐标原点, 比较各时间戳的数值, 它们应该满足 4 维时空同时性要求, 即坐标原点观测者的时钟读数 t_0 是唯一的, 所有卫星应保证与坐标原点的那个时钟的读数相同, 即:

$$t_0 = t_{xi} - \frac{|R_i|}{c}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (5)$$

式中: t_0 ---坐标原点的那个虚拟的时钟读数;
 (R_i, t_{xi}) ---第 i 颗卫星的时间戳.

公式(5)中表达了 4 维时空的同时性原理, 它给出了两个条件, 第一是空间统一条件, 非原点位置上的任何时钟, 都必须有时钟的历表 (R_i, t_{xi}) , 时钟历表的坐标系原点是公认且唯一的; 第二是时间统一条件, 假想在坐标原点有一个时钟, 这个时钟的读数是唯一的, 所有其它非原点的时钟, 按公式(5)换算到坐标原点的时间 t_0 应该相同, 否则, 不满足(5)的时钟需要调整时刻数值.

大地水准面是地球引力势与自转离心势之差为固定常数的等势面. 在大地水准面上的原子钟, 所受到的相对论效应影响, 具有相同的量值, 时钟走速相同可以实现同步, 在大地水准面上能够建立一个同时面. 当前地球上的全球卫星导航系统 GNSS 把质心坐标系原点作为空间基准, 时间基准却建立在大地水准面上, 这是与 4 维时空基准同时性原理不同之处. 大地水准面上的时间基准, 用 16 个本地原子钟复现 SI 秒, 确定大地水准面. 全球 500 个原子钟用加权平均法, 维持国际原子时 TAI 的稳定. BIMP 计算上个月平均值纸面时间, 给出各个时钟偏离平均值的差值, 各地方的时钟修正自己的时钟.

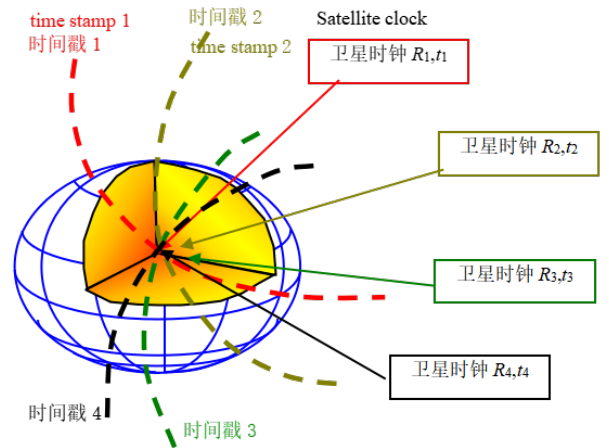


图 3 4 维时空基准的同时性原理.

Figure 3 Principle of Simultaneity in 4D Spacetime Reference Framework.

4 月球守时和授时方案

4.1 三种月球质心坐标系

时间和空间不可分割, 时间规则的前提是约定适合的坐标系. 原时是观测者局域用 SI 秒测量的时间, 坐标时是位于质心坐标系原点或无穷远点时钟测量的时间, 虽然坐标时无法物理实现, 却可以通过转换公式, 从原时计算获得坐标时.

$$\Delta t = \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \Delta \tau} \left(1 + \frac{U}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} \right) d\tau \quad (6)$$

式中: Δt ---坐标时的一段间隔; $\Delta \tau$ ---原时的一段间隔; τ ---原时; U ---观测者位置处的引力势; v ---观测者的速度, 选择的坐标系方向不同, 则旋转运动不同, 速度的幅值和方向也不同.

以质心为坐标原点, 在月球上定义了三种坐标系, 它们的坐标轴的方向和旋转运动各不相同. 绕月卫星和月面观测者相对于原点的线速度, 即公式(6)中的 v 具有不同的数值, 反映到观测者的历表中, 按照坐标时索引的位置 r 和速度 v 具有不同的数值, 观测者在以下三种坐标系中的历表数值都需要由粗到精, 不断迭代更新, 才能实现时间和空间的统一.

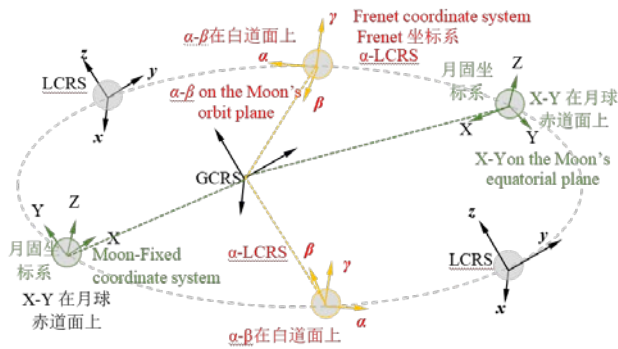


图 4 三种月球质心坐标系的旋转运动方式不同.

Figure 4 The three selenocentric coordinate systems differ in their rotational motion..

1. 月球天球参考坐标系 LCRS

2024 年 4 月第 32 届 IAU 决议 A3“关于建立一个标准的月球天球坐标系 (LCRS, Lunar Celestial Reference System) 和坐标时 (TCL, Lunar Coordinate Time) 的决议”, 与地球质心天球参考坐标系 GCRS 的构建方法相同, LCRS 坐标原点在月球质心, 坐标方向与太阳系质心坐标系 BCRS 相同. 也就是说, LCRS 的坐标轴要保持指向特定的遥远星体, 在这两种椭圆轨道上, 即月球绕地球公转轨道和地月系统绕太阳公转轨道, LCRS 坐标轴与轨道运行速度方向的夹角, 在不同弧段上, 角度变化速率不同, 这种非匀速变化的速度夹角, 就是加速度, 加速度对应的力值被解释为太阳或大天体的潮汐引力. Kopeikin 的论文[5]在 LCRS 坐标系中给出了太阳潮汐引力对坐标时的关系, 计算非常复杂.

2. 月固坐标系

坐标原点在月球质心, 坐标 X-Y 轴在月球的赤道面上, 其中 X 轴指向平均地球方向, Z 轴垂直于月球赤道面^[12]. 地球质心与月球质心连线, 与月球表面的交点, 这个交点不停地变换位置, 把这些点连成的不闭合的类椭圆状轨迹, 像是毛线团, 始终围绕着一个平均中心点, 这个中心点定义了 X 轴的方向, 这个坐标系相对于地球不旋转, 只有摆动, 左右上下摆动角度范围约 $\pm (7 \sim 8)^\circ$, 这种摆动受月球天平动和椭圆轨道的飞行速度角的影响, 在月面的观测者的历表很难具有周期预见性. 这个坐标系方向很难真实测定, 天平动在这个坐标系内运动复杂, 月面上的时钟将有不确定的速度项, 因此, 一般不在这种坐标系内计算月面到质心的时间转换.

3. 费雷内坐标系

费雷内 (Frenet) 坐标系是微分几何学中曲线流形自然的坐标系^[13], 坐标原点在曲线上运动, 其 α 轴指向曲线切线方向, 也是原点的速度方向, γ 轴垂直于密切平面, 密切平面是速度方向 α 与曲率半径方向 R 夹角张开的平面, 对于二体问题的椭圆轨道来说, 密切平面就是轨道平面, β 轴也在密切平面上 $\beta = \gamma \times \alpha$ 符合右手螺旋法则. 若曲线是自由落体的运动轨迹, 则在广义相对论中随自由落体一起运动的坐标系称为 Femi 坐标系, 也有时称作“随动”, Frenet 与 Femi 坐标系有相同坐标原点, 不同的是 Frenet 更强调坐标方向, 而 Femi 只强调自由落体质点的随动, 其方向没有定义. 跟随月球质心一起运动且符合 Frenet 坐标方向的坐标系, 目前还没有名称, 暂用 α -LCRS 代表. 月球绕地月系质心运动的轨道面称为白道面, α -LCRS 坐标系的 α - β 轴在白道面上, γ 轴垂直于白道面, β - γ 轴在子午面上, 子午面在月球表面的交线称为本初子午线, 每月有两个时刻, 即当月球运行到地月系椭圆轨道的拱点时, 月球子午面延伸可通过地球质心, 此时月固坐标系的 X 轴也在本初子午面上. 用 α -LCRS 坐标系编制月球卫星和月球表面观测者的历表, 用坐标时做索引, 符合本地物理规律, 例如开普勒轨道对称性和能量守恒的周期性, 不受太阳引力潮汐的干扰.

本文把 α -LCRS (Lunar Center Reference System - with α axis oriented to motion) 的坐标原点上时钟, 所测量的时间, 作为月球标准的时间. 在月球质心放一个物理时钟是不可能的, 前面已经给出了由原时到坐标时的换算公式(6), 可以在卫星轨道上和月球表面放置守时装置, 测量原时, 计算坐标时, 计算过程中要用到引力势和速度, 但是在费雷内坐标系中存在守恒和对称的物理定律, 公式(6)积分号内存在哈密顿量守恒, 于是公式, 简化成^[14]:

$$\Delta t = (1 + L) \Delta \tau \quad \text{其中 } L = \left(\frac{U}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} \right) \quad (7)$$

式中: L ---坐标时转换系数, 相对值. 当守时装置做自由落体运动时, L 也是守恒量, 受系统能量变化影响.

4.2 去中心化的守时方案

守时是复现标准时间的定义, 保持时间稳定、均

匀、连续的测量过程. 计量对守时的要求是: 1)溯源性: 可溯源到基本物理量常数, ΔC_{us} , SI 秒的定义; 2)同时性: 不同位置的时钟具有同时性, 满足, 若 $A \leq B$ 且 $B \leq C$, 则 $C \leq A$. 其中“ $\leq$ ”符号表示符号两边的时钟具有同时性; 3)约定性: 对于计量基准的定义, 当遇到溯源性不能满足时, 计量学中采用约定参考物和参考量值的方法, 典型案例如: “米制公约”对法国档案尺的约定, 国际单位制对铯原子频率常数 ΔC_{us} 的约定等. 再比如, 本文对坐标原点位置的约定, 是在多个守时装置的不断迭代的检查和调整过程中, 以“偏离平均值最大者调节”的原则, 实现唯一空间参考点的约定. 本文介绍的去中心化守时技术, 首要特征是选择一个大家公认的空间基准参考点, 这个空间点, 不在所谓的等势面上, 等势面很多, 没有哪个等势面具有独特的可被一致公认的理由, 只有让等势面缩小, 再缩小, 直到为零, 观测者所感受到势是引力势和离心势的总和, 两势方向相反, 越靠近质心两势越小, 势能缩小到零后, 仍有一个最小的空腔区域, 等于零势的等势面包围的空腔区域, 也许不是一个确定的点, 质心坐标系原点确定位于这个零势的区域内, 然而去中心化的守时方案需要一个确定的空间位置点, 作为公认的坐标系原点, 本方案是通过约定的方法让每个守时装置认同有一个约定的点, 作为各自历表中位置坐标值的参考点, 即坐标系原点.

第一步: 至少有 4 个及以上守时装置, 分布在坐标系中的不同位置. 守时装置已知历表, 历表作为初始条件, 在后续步骤中不断修正历表, 不断迭代而精确. 所有守时装置能够进行两两比对, 采用传统中继卫星通信技术, 假设双向通信路径延迟对称, 可抵消路径延迟, 直接比对标面读数. 每个守时装置用原子钟测量 SI 秒, 累计测量原时 τ_i , $i=1,2,3,4,\dots$ 表示不同编号的守时装置. 这一步要确保每个守时装置各自地独立溯源到铯原子频率 ΔC_{us} 常数.

第二步: 计算原点坐标时. 每个守时装置计算原点位置处的坐标时, 公式如下:

$$t_i = t_{0i} + \frac{|R_i|}{c} + (1 + k_i)\tau_i \quad (8)$$

式中: t_i , τ_i , $|R_i|$ ---分别是编号 i 的守时装置的原点坐标时, 原时和此时刻到原点的距离; k_i ---原时到

坐标时转换系数; t_{0i} ---初始偏离量; c ---光速.

第三步: 守时装置两两比对, 生成钟差数据. 钟差计算见公式(9), 形成列表, 见表 1.

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j \quad i, j = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

式中: Δt_{ij} ---守时装置 i 与 j 的原点坐标时之差; i , j ---守时装置的编号.

表 1 第 m 次遍历两两比对钟差列表.

Table 1 List of clock difference pairwise comparisons for the m -th iteration.

第 m 次	守时 1	守时 2	守时 3		守时 n
守时 1	-	Δt_{12}	Δt_{13}		Δt_{1n}
守时 2	Δt_{21}	-	Δt_{23}		Δt_{2n}
守时 3	Δt_{31}	Δt_{32}	-		Δt_{3n}
...				-	
守时 n	Δt_{n1}	Δt_{n2}	Δt_{n3}		-

比对频次受通信链路限制, 还受守时装置存储容量限制. 对数据量的要求是: 1)应保证在最小历表周期内遍历两次; 2)存储容量应保证在最大历表周期中保存所有遍历数据. 每个守时装置要保存完整列表, 第 m 次遍历的数据量为 n^2 , 见表 1, 每个守时装置除了保存与本装置相关钟差数据外, 其他两两比对的数据也应被保存, 类似于区块链对数据的分散存储那样. 两两比对所用到的技术为双向通信链路, 在月球上可用鹊桥中继卫星, 或光线网络. 所谓历表周期是指历表中空间参数变化的周期, 当有多种周期叠加时, 把空间参数幅值变化最大的周期作为历表周期. 例如, 运动最快的那颗绕月卫星, 其历表周期就是最小历表周期, 距离月球表面 100km, 圆轨道一个历表周期就是 7084s, 所有守时参与者应在此期间两两比对, 遍历两次, 则每次遍历应小于 3542s. 再例如, 运动最慢的守时装置固定在月球表面, 其历表周期就是最大历表周期, 在 4.1 节的三种坐标系内的运动周期最大为 2551392s, [29.53×86400]. 假设守时装置总数 $n=100$ 个, 则每个守时装置需要保存到数据量为 720, [2551392/3542=720] 个数据列表, 每个表有 100×100 个钟差数据, 约 7.3M 个钟差数据.

第四步: 计算钟差变化率, 检查转换系数 k . 钟差变化率是指两次相邻的历史数据表中, 相同位置的钟差数据之差, 见公式(10). 每个守时装置从钟差数据库中找到自己的序号, 例如, 以序号 i 的守时装

置为例, 按遍历第 m 次后, 列出守时装置 i 的比对钟差数据, 形成钟差变化率列表, 如表 2:

表 2 守时装置 i 的钟差变化率列表.

Table 2 Table of Clock Drift Rates for Timekeeping Device i .

守时 装置 i	守时 装置 1	守时 装置 2	守时 装置 3		守时 装置 n
第 m 次 遍历	$\Delta t_{i1}^{(m)}$	$\Delta t_{i2}^{(m)}$	$\Delta t_{i3}^{(m)}$	 ^(m)	$\Delta t_{in}^{(m)}$
第 $m-1$ 次遍历	$\Delta t_{i1}^{(m-1)}$	$\Delta t_{i2}^{(m-1)}$	$\Delta t_{i3}^{(m-1)}$	 ^(m-1)	$\Delta t_{in}^{(m-1)}$
第 $m-2$ 次遍历	$\Delta t_{i1}^{(m-2)}$	$\Delta t_{i2}^{(m-2)}$	$\Delta t_{i3}^{(m-2)}$	 ^(m-2)	$\Delta t_{in}^{(m-2)}$
.....				-	
第 $m-k$ 次 遍历	$\Delta t_{i1}^{(m-n)}$	$\Delta t_{i2}^{(m-n)}$	$\Delta t_{i3}^{(m-n)}$	 ^(m-n)	$\Delta t_{in}^{(m-n)}$

$$D_{ij}^{(m)} = \Delta t_{ij}^{(m)} - \Delta t_{ij}^{(m-1)} \quad i \neq j \quad (10)$$

式中: $\Delta t_{ij}^{(m)}$ ----守时装置 i 与 j 的钟差, 在第 m 次遍历与第 $m-1$ 次遍历之差, $\Delta t_{ij}^{(m)}$ ----守时装置 i 与 j 的第 m 次遍历之差.

各守时装置从表 1 信息中抽出与自己相关的数据列成表 2, 计算自己与其他各守时装置之间的钟差变化率的平均值 $\bar{D}_i^{(m)}$, 即表 2 中上下两行的平均值之差, 正常应小于一个限值 D_{lim} , 不满足为异常, 即:

$$\bar{D}_i^{(m)} = \frac{1}{n} \sum_{j \neq i} D_{ij}^{(m)} \quad \bar{D}_i^{(m)} \leq D_{lim} \quad (11)$$

式中: $\bar{D}_i^{(m)}$ 为第 m 次两两比对后, 守时装置 i 的钟差变化率平均值; D_{lim} 为钟差变化率限值.

系统初始化时, 钟差变化率限值 D_{lim} 为最初的 4 个守时装置的钟差变化率最大值, 当第 5 个及以后更多新手加入后, 限值 D_{lim} 逐步缩小, 但应始终保持系统中守时装置的数量不少于 4 个.

不满足(11)条件的守时装置, 比如, 第 i 个守时装置, 应退出同时性检查, 但是两两比对的操作继续保持, 在表 1 中仍占有原来的位置, 继续生成钟差比对数据, 调节 k_i 历表后, 参照新手加入程序, 检查满足要求后, 修改第 i 行第 i 列赋值为按(12)计算的初始化时间 t_{0i} . 如何调节 k_i 历表的技术很多, 如 PID 调节算法, 卡尔曼滤波算法, AI 算法, 神经网络算法等.

本文忽略调节的细节.

当新手加入, 例如守时装置 i 新加入表 1 的同时, 其初始时间 t_{0i} 应该调整为

$$t_{0i} = \Delta \bar{t}_j = \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i} \Delta t_{ij} \quad (12)$$

式中: $\bar{t}_j$ 是守时装置 i 与其他守时装置的钟差的平均值, 即表 1 中第 i 行的平均值.

第五步: 检查偏离量, 调节时空延迟距离 $|R_i|$. 检查偏离量是每个守时装置发现偏离, 调节历表的过程. 应按照“偏离平均值最大”的原则选出调节对象. 计算表 1 中的偏离平均值, 见公式(13), 并筛选出偏离平均值最大且大于偏离量限值的守时装置作为超偏者, 见公式(14); 超偏者应主动调节其历表中广播天线位置到坐标系原点的距离 d_i , 直至满足偏离量限值要求, 见(15).

偏离平均值最大原则, 是指在钟差数据表, 表 1 中, 计算每行的绝对值的平均值, 选出最大的平均值所在的那一行.

$$\Delta \bar{T}_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n |\Delta t_{ij}| \quad (13)$$

$$M = \left\{ M \mid \text{if } (\Delta \bar{T}_M) = \max(\Delta \bar{T}_i, i = 1, 2, \dots, n) \right\} \quad (14)$$

$$\Delta \bar{T}_M > T_{lim} \quad (15)$$

式中: $\Delta \bar{T}_i$ 为钟差数据表, 表 1 中第 i 行钟差绝对值的平均值, 也称为守时装置 i 的偏离平均值; Δt_{ij} 为守时装置 i 和 j 的原点坐标时之差; M 为钟差数据表中的行号, 从 $i=1, 2, \dots, n$ 行中选出偏离平均值 $\Delta \bar{T}_i$ 最大值所处的行号 M ; $\Delta \bar{T}_M$ 为第 M 行钟差绝对值的平均值; T_{lim} 为偏离量限值.

初始化时, 钟差数据表中只有 4 个守时装置, 设定为 $T_{lim}=2\Delta T_M$.

每个守时装置同时检查所有其他守时装置的情况, 同时只有一个超偏者, 其他保持不变.

第六步: 计算广播坐标时, 播发时间戳. 时间戳是广播天线的四维坐标值, 用电磁波信号全向传播的形式, 向覆盖区域内提供天线的位置和时间信息, 四维坐标值包括 3 个空间坐标值和一个时间值.

$$t_{ix} = t_i - \frac{|R_i|}{c} = t_{0i} + (1 + k_i)\tau_i \quad (16)$$

式中: t_{ix} ---为广播坐标时, 其他同公式(8).

以上六个步骤是去中心化的守时系统, 建立和不断检查调节, 然后收敛到统一时间和空间基准的过程, “偏离平均值最大者调节”的原则, 使系统不断收敛, 直到表 1 的数据等于时钟自身不确定度区间为止.

四维时空中,空间与时间是对立统一,且相互作用的。若已知时间计算空间,就是当前全球卫星导航GNSS的原理,也是密闭空间内部,如商场、车库等,增强导航定位的原理;若已知空间计算时间,就是本文公式(8)依靠历表 R_i 计算原点坐标时的原理,就像一个硬币的两面,属于同一个事物,在不同应用中的表现不同而已。本论文所用的时空转换原理和四维时空同时性原理是定位和守时共同的基本原理。若在月球附近轨道部署导航卫星,该星座若有4颗卫星配备守时装置,实现上述第一到第五步,如测量、比对、检查和调整等功能的话,就能实现去中心化的守时功能。理论上能达到甚至超过地球当前的GNSS守时和定位水平。若进一步实现计量溯源性要求,就必须把表1“两两比对钟差列表”交由国际计量组织管理,以开放、公开、透明和平权的原则,来设计去中心化的比对规则,用约定规则的方式维护守时系统新旧更替和迭代收敛。

4.3 月球守时装置

月球守时装置由原时时钟、坐标时时钟、历表单元、比对天线、授时单元和广播天线组成, 见图 5.

1. 原时时钟: 是按照 SI 秒定义复现 SI 秒的时间测量装置, 对守时装置的原时进行本地测量; 目前技术状态是用铯原子钟复现 SI 秒, 若国际单位制重新定义 SI 秒, 则随之更新为国际单位制新推荐的测量装置.
2. 坐标时时钟: 是在原时时钟基础上经过公式(6)计算获得原点坐标时, 并经过公式(16)计算获得广播坐标时的时间测量装置. 计算所用的初始化时间 t_{0i} 在守时装置 i 新加入表 1 时被公式(12)赋值, 计算所用的到原点的距离 $|R_i|$ 和转换系数 k_i , 从原时 τ_1 索引的历表单元获得.
3. 历表单元: 用于记录守时装置的历表, 并根据转

换系数检查(第4步)和偏离量检查(第5步)的检查结果,对历表进行调节.历表是原时 τ_1 索引的位置坐标 R_1 和转换系数 k_1 列表,当计算公式(6)(16)时,可在历表中查找数据.

4. 比对天线: 用于与表 1 内其他守时装置通信, 获取原点坐标时比对信息, 比对天线为无线电收发天线, 或者使用激光通信的收发光信号的天线, 要求收发信道延迟对称。
5. 授时单元: 用于产生时间戳, 以便广播给其他时间用户进行授时。授时单元从坐标时时钟获得广播坐标时, 再从历表获得广播天线的位置坐标, 把广播坐标时 t_{xi} 和广播天线的位置坐标 R_i 组成时间戳(t_x, R_i), 通过广播天线广播出去, 让广播覆盖区域内的时间用户接收到时间戳信息, 达到时间和空间统一的目的。
6. 广播天线: 用于广播时间戳信息, 广播天线的空间坐标在历表中表示, 是广播覆盖局域的空间的参考基准。
7. 钟差比对单元: 是保存所有守时装置两两比对的钟差数据形成钟差数据表(表 1)和钟差变化率表(表 2)并根据钟差数据表和钟差变化率表进行转换系数检查 and 偏离量检查, 可具备保存长期历史数据和保留一定的扩充守时装置数量能力。

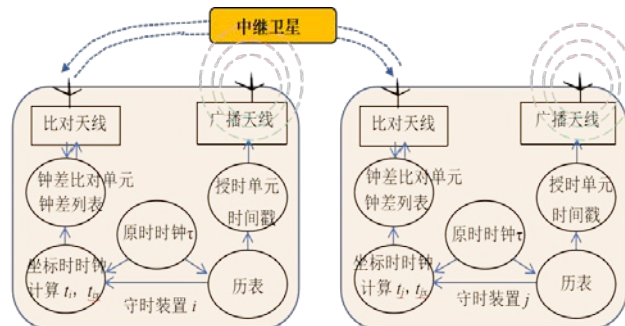


图5 守时装置组成.

Figure 5 Composition of the guard device.

图 5 中影响整个守时系统水平的测量不确定度来源有：1) 原时时钟，或者复现 SI 秒定义的原子钟引入的测量不确定度；2) 初始化历表不准确引入的不确定度；3) 双向时间比对信道不对称引入的不确定度；4) 比对信道（包括中继卫星和比对天线等）噪声干扰引入的测量不确定度等，最终随着守时装置的反馈的调整，可以收敛到最小的范围，这个范围是上述测量不确定度的综合合成的结果。

4.4 月球授时方案

授时是传播标准时间, 让所有时间用户的时间与标准时间同步的过程. 每个守时装置都有一个授时单元, 通过广播天线发送时间戳, 时间戳就是 4 维时空信息, 时间用户收到授时信号后, 就可以解算出坐标时信息, 如同 GNSS 的解算方法, 本文不再详述.

授时方面, 规定使用射频或激光等无线信道播发月球标准时间, 应同时附带坐标信息. 规定授时频率和带宽, 规定报文信息内容和格式. 1pps 秒脉冲限制在局部小范围内或有线网络内使用. 不同国家、组织、系统、或任务可以规定自己的时间起点, 按先来后到的原则, 后加入的授时者, 若启用新的时间起点, 应同时在报文中说明与前者时间的关系, 且不能干扰前者的信道. 对时间信息的内容格式提出统一要求, 时间信息满足不同时间用户需求, 可全面包含, 也可简化, 如月球历法(历法单位) + 月球坐标时(SI 秒) + 位置坐标 + 与前者时间起点的差值 + 地球的对照时间. 其中地球的对照时间是守时系统测量后附加的, 不是标准时间所必须的信息, 也不是线性变化.

5 结论

现有的地球上的时间计量体系, 不能直接用于地球以外的行星. 相对时间观告诉我们“时间与空间不可分割”, 各局域坐标系之间的时间统一依靠空间守时系统, 而局域内部的时间统一既可以使用当前的“中心守时”, 也可以使用本文提出的“去中心化守时”, 基于时空同时性原理和计量基准的约定性原理, 通过检查钟差变化率, 调节原时到坐标时转换系数, 再检查钟差偏离平均值最大者, 调节历表参数, 让系统中的每个守时装置都参与计算, 并主动调节, 最终收敛到原子钟组的固有指标限值上, 既统一了时间, 又统一了空间, 实现了去中心化的守时方案.

月球时间计量与月球卫星定位导航(PNT)既相似又不同, 首先, 两者的理论基础是相同的: 以时间和空间不可分割和四维时空同时性原理为基础理论; 其次, 两者适用范围不同: 独立的 PNT 可拥有自己

定义的时间基准, 无需与其他系统统一时间, 但是时间计量必须满足所有时间用户的统一要求, 后者应用范围更广; 最后, 是两者的管理特点不同: 计量管理特点是协约、法制、公平、公正和透明, 而 PNT 管理各自为政, 不完全公开, 对用户是有选择、有条件的. 总之, 月球时间计量是月球 PNT 的基础, PNT 是已知时间求解空间, 守时是已知空间求解时间, 两者相互迭代才能保证长期稳定.

当两个时钟存在钟差, 它们既不同步, 也不同时, 如何判定哪个是准确的呢? 计量要解决的终极问题是“谁更准?”当遇到两个或多个时钟对不上表时, 哪一个更准的问题就是计量管理的问题, 计量管理上更看重“溯源性”和“约定性”. 溯源性是基于自然原理对物理量进行定义, 要求溯源到 7 个基本物理常数, 用测量数据说谁更准; 约定性是指区域内所有相关方约定达成一致, 用特定的方法、或特定标准物质, 以组织授权的方式实现计量统一. 地球以外的时间和空间统一必须依靠计量学的“溯源性”和“约定性”这两种方法.

月球时间规则问题是局域上的时间统一问题, 可以在局域内用守时和授时的方法解决, 若涉及跨局域之间的时间统一问题, 就需要用基于脉冲星的空间守时系统来解决.

本文提出的去中心化守时方案相比传统的“中心守时”, 优势具体体现在以下几个方面:

- 1) 可在月球、火星等其他天体, 构建其本地的时间计量体系, 不受地球的标准时间约束, 可独立自主地构建当地局域的守时系统;
- 2) 去中心化的守时方案, 不依赖于某一航天器, 或某固定位置, 或某等势面, 整个系统可实现动态地新旧更替, 不间断地继承和维持时间连续性和稳定性, 有利于低成本长期维护;
- 3) 在四维时空同时性原理基础上, 与 GNSS 系统兼容, 守时装置可设计在导航卫星内部, 工程化可行性更强;
- 4) 充分利用了计量溯源的约定性原理, 可溯源至国际单位制 SI 秒的定义.

致谢 感谢李得天院士和中国空间技术研究院的资助, 李得天院士引领的空间计量方向是新发展出来的特色专业, 地球以外时间规则以及月球时间计量正是空间计量专业面临的重大而急迫的科学问题, 对李院

士鼓励创新, 支持基础研究的远见卓识表示敬意和感谢。

参考文献

- 1 Liu M. Is there a rule to unify time out of the Earth?(in Chinese)//China Association of Science and Technology. 2021 Assembly of Major scientific issues, Engineering technical problems and industry technology issues. China Sci and Tech Press, Beijing, 2021:20-25 [刘民.地球以外有统一的规则吗? 见: 中国科学技术学会主编, 2021 重大科学问题, 工程技术难题和产
业技术问题汇编.北京:中国科学技术出版社,2021:20-25]
- 2 Liu M, Wang Q J, Shuai P, et al. Discussion on time rule out of the Earth. 2022 3rd URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC), Gran Canaria, Spain, 2022, pp. 1-4.
- 3 Liu M., Peng M., Liu B Y., Time unit and Time measurement in Space Metrology(in Chinese). Journal of electronic measurement and instrumentation,[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]
- 4 www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2024/04/Celestial-Time-Standardization-Policy.pdf
- 5 Kopeikin S M, Kaplan G H. Lunar time in general relativity. Phy Rev, 2024, 110(8): 084047
- 6 Ashby N, Patla B R. A relativistic framework to estimate clock rates on the Moon. Astron J, 2024, 168: 112 (14pp)
- 7 Liu M., Sun Y.,Review of elementary constants in international system of units(in Chinese). Journal of electronic measurement and instrumentation, ,2021,35(1):1-9[刘民,孙毅.国际单位制的基本常数综述.电子测量与仪器学报,2021,35(1):1-9]
- 8 Liu M, Shuai P, Ping J S, Wang Q J. Study on the rule of time out of the Earth (in Chinese). J Electron Meas Instrum, 2022, 36(7): 1-8 [刘民, 帅平, 平劲松, 王乾娟. 地球以外的时间规则研究. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 1-8]
- 9 Liu M, Tong M L, Ping J S, Liu W B, Fang H Y, Zhou Q Y, Shuai P, He K L. Method of coordinate time reproduction using pulsar pulse number (in Chinese). Chin J Sci Instrum, 2024, 44(2): 184-192 [刘民, 童明雷, 平劲松, 刘文彪, 方海燕, 周庆勇, 帅平, 何克亮. 用脉冲星的脉冲序号复现坐标时方法. 仪器仪表学报, 2024, 44(2): 184-192]
- 10 Zhao Z, Liu W B. Foundation of General Relativity (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 10 [赵峥, 刘文彪. 广义相对论基础. 北京: 清华大学出版社, 2010: 10]
- 11 Soffel M, Klioner S A, Petit G, Wolf P, Kopeikin S M, et al. The IAU 2000 resolutions for astrometry celestial mechanics and metrology in the relativistic framework: explanation supplement. Astron J, 2003, 126: 2687-2706
- 12 Liu M, Ping J S, Wang Q J. Discussion on the calendar of the Moon (in Chinese). Acta Metrol Sin, 2025, 46(3): 309-315 [刘民, 平劲松, 王乾娟. 月球历法中的问题讨论. 计量学报, 2025, 46(3): 309-315]
- 13 Sun H J, Zhao P B. Modern Differential Geometry (in Chinese). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 15 [孙和军, 赵培标. 现代微分几何. 北京: 电子工业出版社, 2015: 15]
- 14 Liu M, Ping J S, Li W X, et al. Lunar and Earth Time Conversion Based on The Principle of General Relativity (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025,55(9),<https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0057> [刘民, 平劲松, 李文潇, 等. 基于广义相对性原理的月球与地球时间转换. 中国科学: 物理学 力学 天文学,2025,55(9), <https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0057>]

The Rule of time Outside The Earth- as example of the time keeping and time service on the Moon

LIU Min¹, YU Hezhen^{1*}, JIN Hongbo², PING Jinsong², LI Wenxiao², WANG Yongjun³,
CAO Zhoujian⁴, ZHANG Wenzhao^{2,4}, SHAO Mingxue^{2,5}, YANG Jie⁶ and YAN Jianguo⁷

¹ Beijing Orient Institute of Metrology and Test, Beijing 100094, China;

² National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³ Lanzhou institute of physics, National Key Laboratory on Vacuum Technology and Physics Lanzhou, 730000, China;

⁴ Department of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100091, China;

⁵ Institute of Electrical Engineering of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

⁶ Lanzhou University, Lanzhou Center for Theoretical Physics, Key Laboratory of Theoretical Physics of Gansu Province, and Key Laboratory of Quantum Theory and Applications of MoE, Lanzhou, Gansu 730000, China;

⁷ *State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430070, China;*

How to unify time outside the earth, from the point of view of relative time, using the two concepts of proper time and coordinate time in relativity, to combine time and space. The physical significance of the simultaneity compensation term in the resolution formula of the International Astronomical Union is analyzed, and the projection relationship of the meridian equivalent simultaneous plane contained in the compensation term is illustrated. There are three different forms of the moon's center of mass coordinate system, which have different axes orient and different rotational motions. Only in the Frenet coordinate system are there symmetrical and conserved laws of physics, and simple conversion coefficients that relate the proper time to the coordinate time. We define lunar standard time at the origin of the Frenet coordinate system, not on a equipotential surface, and only the coordinate time at the origin are recognized and unique. Let multiple timekeeping devices measure their respective local proper times. Converter this proper time to coordinate time like as the origin, and compare the origin coordinate time pairwise. Save the two-dimensional data table of the clock difference, and check out one which the rate of change in clock difference is the largest, to adjust its conversion coefficients of coordinate time. Select the timekeeping device with the largest deviation from the average value, to adjust its ephemeris. When the clock difference converges within a specified range, the coordinate origin can be agreed upon, achieving uniformity in coordinate time. There are three basic principles: 1) traceability; 2) four-dimensional space-time simultaneity; 3) conventionality.

Time rules; time metrology; decentralization; timekeeping devices; coordinate time; space-time simultaneity; Space Metrology

PACS: 04.20.Cv, 95.10.Jk, 06.30.Ft, 04.80.Cc, 95.75.Pq

doi: