

《月球标准时间定义及其溯源性》 国家计量技术规范编制说明

编制组

2026 年 9 月 16 日

目录

1. 工作内容	1
1.1 任务来源	1
1.2 采纳国际建议说明	1
1.3 工作概况	2
1.4 工作过程	5
2. 编写原则和主要内容	6
2.1 编写原则	6
2.2 主要内容	6
3. 规范起草说明	6
3.1 范围	6
3.2 引用文件	6
3.3 术语	7
3.4 月球标准时间实现方法	7
3.5 附录 A 四维时空同时性原理	7
4. 主要试验验证情况及预期达到的效果	7
附录 A: 月球时间计量的中国提案	12
附录 B 去中心化的守时方法	15
B.1 条件	15
B.2 步骤	15
B.3 收敛	18
附录 C 授时方法	19
C.1 授时装置与守时装置的区别	19
C.2 第一类时间用户	20
C.3 第二类时间用户	20
C.4 第三类时间用户	20
参考文献	21

《月球标准时间定义及其溯源性》编制说明

1. 工作内容

1.1 任务来源

2024年11月30日，全国空间计量技术委员会成立，确定了地球以外时空基准的在标准体系中的位置，其中包含月球时间计量相关内容。2026年5月9日，国家市场监督管理总局办公厅发布了“关于印发2026年国家计量技术规范项目制定、修订及宣贯计划的通知”，由全国空间计量技术委员会（MTC45）归口组织编写国家计量技术规范《月球标准时间定义》（计划项目编号MTC45-2026-03），起草单位为北京东方计量测试研究所，中国计量科学研究院等单位。

本规范是首次制定的国家计量技术规范。

1.2 采纳国际建议说明

本规范没有采纳任何国际标准。

国际建议有2026年10月即将发布的第28届国际计量大会决议草案D，题目“关于国际月球参考时间尺度的定义及其与UTC的溯源性”与本规范直接相关^[1]。以下内容待国际建议正式通过后，视情跟进，对应落实情况如下：

本规范落实了决议D之提醒（*recalling that*）部分的2条内容：1）译文“在第26届CGPM会议（2018年）上，通过了第2号决议《关于时间尺度的定义》，其中明确指出：UTC是唯一被推荐作为国际参考标准的时间尺度，并且是大多数国家民用时间体系的基础。”在本规范中的4.1、4.2、4.3中均有相关文字落实月球标准时间与UTC比对的关系；2）译文“作为《国际单位制手册》附录发布的《国际单位制中秒单位定义的实施指南》指出：‘秒的定义应理解为‘原时’单位的定义。’”落实在本规范3.2原时的定义中，强调其单位是SI秒。

本规范落实了决议D之此外还需指出（*further noting that*）部分的3条内容：1）译文“一个基于月球坐标系、并充分考虑广义相对论效应的时间尺度，可以是TCL本身，也可以是经过缩放处理的TCL版本（即TCL加上一个约定好的频率差值）”，落实在本规范3.10月球质心坐标时的定义中，是坐标原点处的坐标时，与IAU的TCL数值相同，即TCL本身。2）译文提及的“TCL缩放版本”在本规范4.1、4.2中落实为原时到坐标时转换公式（1）~（4）的缩放运算；3）译文“鼓励航天机构开展开创性的月球项目，将其实践经验与科学界分享；”落实在本规范的3.1和4.3中，属于

此类开创性内容。

本规范落实了决议 D 之建议（**recommends that**）部分的 1 条内容：译文“若考虑与月球大地水准面对应的 TCL 比例缩放版本，则其相对于 TCL 的频率偏移值，应依据国际天文学联合会（IAU）和国际地球物理联合会（IAG）等相关国际组织约定的引力势固定值确定，且其历元与 IAU 定义的 TCL 历元一致。”落实在本规范中的 4.2 中，给出了公式（4）其中 U 是引力势关联到频率偏移值的对应项，不论是约定固定值还是实测值，公式（4）均能适用。关于“历元”的建议落实 4.4 的表 1 中，举例月球时间历元开始于 UTC1977 年 1 月 1 日 0h00m00s，符合第 32 届 IAU2024 决议 C3 之建议 4（2024 年 4 月 15 日）。

本规范落实了决议 D 之进一步建议（**further recommends that**）部分的 2 条内容：1）译文“国际计量委员会（CIPM）始终重视此类开创性项目的成果，并在必要时就月球参考时间尺度的定义以及 BIPM 在月球时间协调与 UTC 比对中的作用采取相应措施。”国际计量委员会（CIPM）是计量管理机构，也是 BIPM 这类技术机构的上级管理机构，月球时间方面的空间计量管理，首次明确由 CIPM 机构介入。在本规范中的 4.2、4.3 中落实了有关计量管理机构的作用，同时均提及本规范定义的月球标准时间与 UTC 的比对关系，强调用对照表，如 4.4 节的表 1 形式表达。2）译文“BIPM 与国家计量研究所（NMIs）将与各国航天机构及多个国际组织合作，在 UTC 国际标准时间社区的参与下，支持月球参考时间尺度的多种实现，并将其与 UTC 参考进行测量。”落实在本规范的第 4 章中，给出月球标准时间的三种实现方法，以及与 UTC 的比对关系，本规范编制组有中国计量科学院牵头，符合国际建议的要求。

1.3 工作概况

空间计量是保证地球以外测量单位统一，量值准确可靠的技术和管理活动，当前面临的首要问题是，如何建立月球上的时间计量体系，需要从月球标准时间定义开始。

统一时间是为服务于月面和月球附近空间的人类活动，然而，地球上的标准时间是局部时空参考系上的时间，不能直接用于月面和近月球轨道空间，需要在月球上建立局部独立的本地时间计量体系。依据四维时空广义相对论和四维时空同时性原理，在月球质心坐标系上定义适用于月球及其附近的标准时间是构建月球时间计量体系的必要环节之一。月球时间计量体系，包括了标准时间和历法，由守时装置复现月球标准时间，由天文观测提供月球历法时间，结合两类计时单位和数值后，再通过授时信道广播传递月球时间，对在月球开展的协调一致的活动具有重要且基础的意义。

目前，国家尚未制定月球时间相关的计量技术规范，经文献调研，和专家咨询，月球时间定义正是 2024-2026 年国际热议的话题。为应对国际规则话语权的挑战，本规范编制组于 2024 年开展了月球标准时间的研究，2024 年 9 月中国空间技术研究院院士课题，在李得天院士建议下，立项了“月球时间计量体系构建”的项目，2025 年 11 月结题，取得了创新的成果。2025 年 1 月 17 日，国际无线电科学联盟 URSI 中国委员会 commission A 成立月球标准时间工作组，主要由相对论和天文学以及时间频率计量相关的学者组成，一起合著论文“基于广义相对性原理的月球与地球时间转换”，提出了原创的“去中心化守时方法”和“四维时空同时性原理”^[2]。2025 年 2 月 8 日，依托中国空间技术研究院院士课题“月球时间计量体系构建”，成立了月球时间计量工作组，围绕“在国际标准中提出中国方案”的目标，形成了三点共识“相对时间观，中国话语权，争夺原创先机”。2025 年 3 月 30 日，月球时间工作组开展学术研讨，提出了“去中心化的守时方法”。2025 年 7 月 5 日，URSI commission A 月球标准时间工作组讨论通过了“月球时间计量”中国方案。在中国电子学会微信网站公开征求意见，到 7 月 30 日截止，收到一条意见。8 月 20 日 URSI 中国代表在澳大利亚的悉尼 AP-RASC2025 会议上提交了中国方案。

国际组织如国际天文联合会 IAU，国际大地测量学会 IAG，国际计量局 BIPM 等成立了月球标准时间工作组，近两年频繁召集会议，2024 年 4 月 15 日，国际天文联合会 IAU 出台 IAU2024 第 2 号决议^[3]，定义了月球天球坐标系（LCRS）和月球坐标时（TCL），IAU2024 第 3 号决议提出国际组织约定协调月球时间标准的建议^[4]。2024 年美国 Kopeikin 和 Kaplan^[5]，Ashby 和 Patla^[6]，Slava G. Turyshev^[7]等多位学者发表论文，他们都基于 IAU2000 决议 B.3 描述的太阳系坐标时与地球时间的转换公式，推出了月球坐标时 TCL 和月面时间 LT 到地球时 TT 的转换方法，计算了两处时钟受相对论效应影响，支撑了月球与地球标准时间独立的理论基础。欧洲学者 Bourgoïn 和 Defraigne^[8]，把上述论文的成果总结加工成月球标准时间的三个选项，其论文与 BIPM 调查问卷内容一致。与美国采取的策略不一样，欧洲航天局针对其“月光”长期计划，沿着三个选项思路，论证提出了一个月球通信、导航与授时系统架构，计划在月球表面部署差分系统和一座参考站，名为“NovaMoon”的计划已在 2025 年部长级会议上获得 ESA 成员国的支持与批准，定于 2026 年启动实施^[9]。

紫金山天文台的卢旭等，发表了题为“月球时间历表 LET440：用户手册”的论文^[10]，2025 年 8 月 20 日在第八届基本天文学学术研讨会上，卢旭做了交流报告。所

提出的 LET440 历表可实现 TCL 与太阳系质心动力学时 (TCL-TDB) 或太阳系质心坐标时 (TCL-TCB) 之间的数值转换。紫金山天文台的杨天宁提出了“月面时对齐轨道”^[11], 在这种特殊轨道上卫星时钟与月面时钟的相对论效应相同。中科院国家守时中心的尹东山 2025 年 9 月 25 日在湖南株洲召开的“第四届北斗规模应用国际峰会”第六分会场“深空与月球导航技术交流会”上做了题为“月球时间基准建立”的报告^[12]。2025 年 2 月、7 月尹东山两次参加了 BIPM 的月球时间工作组会议^[13]。他的报告介绍了 BIPM 的月球时间工作组的动态, 以及 BIPM 的问卷调查。

2025 年 10 月 BIPM 发出调研问卷, 向相关国际组织征求对月球标准时间三个选项的意见^[14]。选项 1 (Option 1, O1), 定义月球质心坐标系的坐标时为月球标准时间; 选项 2 (Option 2, O2), 定义月面某个等势面为参考面, 固定在其上的原子钟复现 SI 秒的月面原时为月球标准时间; 选项 3 (Option 3, O3), 让月球时钟跟随地球时 TT 进行调节, 月球的标准时间来自于地球。

2026 年 6 月 30 日, BIPM 网站公布了第 28 节 CGPM 大会决议草案, 其中决议 D 题目为“关于国际月球参考时间尺度的定义及其与 UTC 的溯源性”与本规范直接相关。规范的正文引言部分详述了本规范落实国际建议的情况, 见 1.2 节。

2026 年 8 月 19 日, 国际无线电科学联盟 URSI commission A 的各国主席协调工作会上, 新一届主席把“空间计量”“月球时间基础设施”作为最新发展方向。在 URSI-GASS2026 波兰的 Space Metrology 专题会场上, 中国代表做了“月球历法研究进展”“月球时间计量建议”的报告, 比利时、法国、日本学者 Pascale Defraigne, Mamoru Sekido, Patrizia Tavella 等做了“CCTF 月球时间工作组活动”的报告。

IAU2000 决议给出了地球天球坐标系 (GCRS) 和太阳系质心坐标系 BCRS 的度规, 并未给出月球质心参考系 (LCRS) 的度规, 关于 LCRS 所用的度规形式似乎缺乏国际的协议或标准, 然而, 国内的研究表明, 在同一个坐标系内的坐标时与原时的关系, 可从度规张量的表达式推导过来, 参考文献[2]和[15]中的公式(6)是重要理论研究成果, 此公式可作为最重要的时间统一桥梁。

《月球标准时间定义》编制目标是针对地球上的标准时间不能直接用于月球的问题, 面向月球表面及其附近空间建立独立的本地时间计量体系的需求, 依据广义相对论和时空同时性原理, 在月球质心坐标系上定义适用于月球及其附近的标准时间, 用于守时装置复现月球标准时间, 授时信道广播传递月球标准时间来服务月面和月球附

近的人类活动，为构建月球时间计量体系奠定基础。

综上，月球标准时间定义成为争夺国际计量规则话语权新的高地，第 28 届国际计量大会将于 2026 年 10 月投票通过决议 D，关于月球标准时间提出了国际建议和计量管理需求。本规范在概念、理论和实现方法上相比国际建议有很多原始创新，月球标准时间的中国方案，应尽快在国内统一思想，达成一致是，才能在国际上引领先进的技术方法，和超前理念，增加中国人在国际规则方面的话语权。

1.4 工作过程

1) 2025 年 10 月 23 日，《月球标准时间定义》计量技术规范制定申报书，经过 MTC45 推荐，提交到总局计量司。

2) 2026 年 5 月 9 日，国家市场监督管理总局办公厅发布了“关于印发 2026 年国家计量技术规范项目制定、修订及宣贯计划的通知”，2026 年 5 月 31 日编制组建立微信群，正式成立《月球标准时间定义》编制工作组，下文中称为“编制工作组”。2026 年 7 月 17 日 MTC45 秘书处摘转空间计量相关编制任务。

3) 2026 年 6 月 1 日~30 日，编制组就第一版《征求意见稿》和《编制说明》发表意见，形成《编制组阶段意见处理》共 34 条。

9) 2026 年 7 月 10 日，编制组第一次工作会，形成《第一次编制组工作会上意见处理表》，共 12 条。对照意见修改，形成第二版《征求意见稿》和《编制说明》，7 月 20 日在微信群内征求编制组意见。

10) 2026 年 7 月 20 日~31 日，编制组就第二版《征求意见稿》和《编制说明》发表意见，形成《编制组阶段意见处理（第二版）》共 13 条。

11) 2026 年 8 月 1 日~21 日，编制组就第三版《征求意见稿》和《编制说明》发表意见，形成《编制组阶段意见处理（第三版）》共 4 条。

12) 2026 年 8 月 31 日，编制组向 MTC45 提交了《征求意见稿》和《编制说明》，拟征求意见单位 100 家。

13) 2026 年 9 月 12 日，编制组第二次工作会，形成《第二次编制组工作会上意见处理表》，共 34 条。对照意见修改，形成第五版《征求意见稿》和《编制说明》，9 月 16 日在微信群内征求编制组意见。

14) 2026 年 9 月 16 日，全国空间计量技术委员会 MTC45 组织 2026 年计划项目的征求意见稿评审，编制组根据专家意见进行了修订，修成第六版征求意见稿，9 月 17 日~20 日在编制组征求意见。

14) 2026 年 X 月 X 日, 编制组召开规范预审会稿讨论会, 会议采用线上形式, 编制组全体成员参加, 对编制说明、规范评审进行了审查, 形成评审会稿。

15) 2026 年 X 月 X 日, 编制组在北京召开了《月球标准时间定义》计量技术规范评审会, 会议采用线下和线上组合的形式, X 位主审专家出席线下会议, 编制组全体成员参会, 对编制说明、规范初稿进行了逐条审查, 对规范初稿提出了审查意见, 编制组在此基础上进行了修订并形成了报批意见稿。

2. 编写原则和主要内容

2.1 编写原则

1) 依据国际计量大会有关国际月球时间参考的国际建议, 以科学对应, 全面覆盖需求, 不照搬, 不雷同为原则;

2) 坚持创新原则, 用原创的方法解决地球以外时间统一问题;

3) 坚持历史正确性原则, 充分兼容已经成功的探月工程, 给与我国成功的案例, 赋予历史成功案例的合法性;

4) 月球时间的定义是唯一的, 溯源方法可以有多种不同;

5) 本规范属于计量技术规范的“其他”大类, 既不是纯粹的术语定义, 也不是计量检定规程和校准规范, 正文格式借鉴“其他”同类规范。

2.2 主要内容

按照国家计量技术规范中术语和定义类规范的编制要求, 本规范内容结构上共分为五章, 以及两个附录。分别是第一章范围, 第二章引用文件, 第三章术语及定义, 第四章月球标准时间溯源方法, 附录 A 四维时空同时性原理。

3. 规范起草说明

3.1 范围

本规范规定了月球质心坐标系上四维时空局部空间的月球标准时间的定义、实现方法, 适用于月球表面及其附近轨道空间。

3.2 引用文件

引用的文件包括:

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1180 时间频率计量名词术语及定义

GB/T 30114.3-2014 空间科学及应用术语 第三部分: 空间天文

国际天文联合会的 IAU2024 决议 2: Resolution to establish a standard Lunar Celestial Reference System (LCRS) and Lunar Coordinate Time (TCL)

3.3 术语

有 11 条术语，对“费雷内坐标系”“原时”“坐标时”“原点坐标时”“守时”“时间戳”“历表”“历表周期”“协调世界时”“月球坐标时”“月球质心坐标时”、“月球标准时间”“守时装置”“月球频率标准”“月球标准时间溯源性”等进行了定义。

其中“月球质心坐标时”在本规范中被定义为“月球标准时间”，数值相等，两概念分别用于不同场合，在计量相关的文章中和计量标准中使用“月球标准时间”，在与时间和空间，以及天体相关的学术文章中使用“月球质心坐标时”。

3.4 月球标准时间溯源方法

有三个实现方法，地球 UTC 传递法、本地守时基准法、去中心化（或分布式）守时法，对 UTC 与月球时间对比表进行了举例说明。

3.5 附录 A 四维时空同时性原理

4. 主要试验验证情况及预期达到的效果

2026 年 6 月 30 日在 BIPM 网站公布了第 28 届国际计量大会（CGPM）即将投票的草案，其中决议 D 的草案中，提到“**欢迎**各航天机构和参与月球项目的空间社群组织所提供的支持，并感谢他们对探讨建立可能的月球标准时间所作的贡献。”还提到“**鼓励**航天机构开展开创性的月球项目，将其实践经验与科学界分享；”本规范编制组的工作符合国际组织的鼓励和期望。决议 D 草案中“进一步建议 **further recommends that**”提到，月球标准时间可以有多种实现方法，以及多种与 UTC 比对的方式。

结合当前探月工程的实际情况和国际上月球标准时间定义的研究成果，本技术规范独立出第 4 章以便对应 CGPM 决议 D 草案对实现方法的要求，提出三种实现方法尽可能包含当前遇到的各种情况，实施方面更符合月球开发和探索的工程实际，尤其是把中国探月工程已经实现的嫦娥系列任务中，正在实施的时间统一方法，列为计量技术规范确认的合规合法的时间统一方法，并明确其转换到月球质心坐标时计算方法，

以及溯源到地球 UTC 的方式。

三个实现方式如下。

第一钟实现方式，称为地球 UTC 传递法。该方法符合当前工程实际，已经开展的探月工程，如嫦娥工程，以地面测控站的时钟为基准，对绕月、落月和返回等航天器进行了时间统一，由于对时间同步的要求较低（5ms），依靠单向测控信号的广播授时技术，即可达到毫秒量级时间同步，而且单独的航天任务，无需与其它系统进行协调同步，自成体系可保证任务成功。在独立月球任务中的时间统一问题并不突出，但随着月球任务数量增加，尤其在主体之间存在跨时代、跨地区（国家）、跨系统、跨任务等多个月球时间用户之间，需要协调工作、相互通信以及追溯历史的情况，就会出现以哪个时间为准的时间统一和历法问题，地面标准时间成为不约而同的、首先考虑时间参考，在此背景下地球 UTC 传递法，在指标需求不高时可以作为月球标准时间的一种简单实现。目前鹊桥中继卫星搭建了双向时间比对链路，双向时间比对可抵消路径延迟（地月距离延迟 750ms 左右）的影响，路径对称补偿后，消除了相对运动造成的影响，不间断地开展双向时间比对，能实现钟差 $1\ \mu\text{s}$ 以内的时间同步。相比之下，参考文献【2】计算地月之间的相对论效应的影响达到 $7\text{E}-10\text{s/s}$ （ 0.7ns/s ）量级，包含长期偏离和周期性偏差，累计 86400 秒后，地球和月球两地时间累计偏差可达 $58.7\ \mu\text{s/d}$ ，2025 年 10 月的 BIPM 调查问卷中的选项 3（Option 3, 03）介绍了这种方法。但是，一些欧洲学者主张排除该方法，理由有三：一是违反了基本物理规律，从广义相对论的角度，这种跨越两个坐标系直接比对原时是违反物理规律的；二是准确度难以提升；三是火星等更远的天体不适用。这是给地球以外时间计量理论提出未来发展需求，表面上是准确度和复杂度以及物理规律的问题，借题发挥还有更深层次的考虑。当前在弱引力场条件下，工程需要这种方法，部分坚持绝对时间观的人容易理解这种方法，能在短期内实现月球时间统一的目标，需要与地球上的测控站比对，按照月球质心坐标时 TCCL 与 UTC 的转换模型调节时钟，此阶段尚不能实现月球独立的时间。本规范编制组调研了中国探月工程现状和未来月球任务的发展需求，认为中国必须自己承认和确立已实现的嫦娥、鹊桥等成功案例，计量法规中给予其法理上合法性，这样才能在成功的基础上站稳阵地，除了提高认知水平外，更重要的是由谁制定空间计量的法理依据的问题。工程案例的正确与否由谁评判？这是国际舞台上的话语权。

第一实现方式的月球标准时间定义，要注意以下问题：

1) 被地球标准时间驯服的月球用户时钟，不能作为复现其它物理常数的自然基准，不是铯原子频率常数 ($\Delta\nu_{\text{Cs}}$) 的复现；

2) 地球上的全球卫星导航系统 (GNSS) 或地面测控站广播的授时信号，受多普勒频移、几何效应和路径延迟变化的影响，不能直接驯服月球时间用户的时钟，应采用双向时间比对链路比对两地时间；

3) 频率标准仅适用于局域范围，1PPS 秒信号仅适用于局域或有线连接的系统内，不能在相对运动的两地之间传递标准时间和频率信息。曾经有频率远程校准的技术，应附加一个条件：“即在同一坐标系内相对静止”。频率是事物或现象变化快慢的物理量，把单位时间作为分母，就必须说清楚，这个“时间”概念是什么时间：原时？坐标时？国际单位制 SI 秒定义采用铯原子频率常数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ，从原子热运动造成铯原子钟频谱展宽的现象推出，原子运动速度为零，即绝对零度条件下，才能实现 $\Delta\nu_{\text{Cs}}=9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ 为单谱线，否则，热运动的多普勒效应将展宽频率谱线，由此可见，只有自己相对于自己不运动，即以本地为参考系，以本地原时为分母，才能实现基准频率，因此频率的概念是局域受限的，跨域不同的局域远程传递标准频率信号，虽然可行，但是准确度不可信。例如，若已知相对运动速度，再补偿多普勒效应，当相对速度的测量不确定度达到 $1\text{E-}14$ 量级时，多普勒效应引入的测量不确定度将达到 $2\text{E-}14$ 量级，频率标准远程传递应考虑相对速度测量不确定的影响。所以，准确度指标要求高于 $1\text{E-}15$ 的 1PPS 秒信号仅适用于局域或有线连接的系统内，不能在相对运动的两地之间传递标准时间和频率信息。

4) 定义月面频率标准的意义。月面本地的频率标准发送到地球观测站，或者地球观测站的频率标准发送到月球表面，双方均应以本地频率标准为参考检验（或比对）对方的频率信号，在频率比对仪器上记录频率差值，形成长期比对差值记录表格，与理论计算和预测的差值相比较，可实现故障预警、检验修正模型或者发现地月之间相关物理影响量的变化，为后续地月时间提供参考。定义局域频率标准的目的是明确频率标准仅仅在本地局域内有意义，信号传输路径和相对论效应的影响，是接收方考虑的事情，若需要利用此信号作为参考，则需要修正路径、运动和相对论效应等影响。

第二种实现方法，称为本地守时基准法。该方法是过渡过程，在守时装置的数量还不够去中心化要求的情况下，先行布设月球表面的计量标准。该阶段的主要特点是

独立，发挥计量管理机构（或其他权威机构）的作用，对守时装置提出入门级的条件，约定或者授权复现 SI 定义的基准和备份基准。在月球表面复现 SI 秒的定义，实现本地化溯源，这是广义相对性原理的基本要求，确保物理规律在本地的形式不改变。2025 年 10 月的 BIPM 调查问卷中的选项 2（Option 2, 02）主张先确定月球上的一个参考等势表面，落月的守时基准在这个参考等势面上复现 SI 秒，如同地球上的大地水准面，并由计量管理机构（或其他权威机构）约定该等势面为基准面，广义相对论让非等势面上的其他时钟，修正（英文 steering）钟面时间，修正系数与高程相关。2025 年 7 月中国方案公开征求意见（8 月提交到 URSI^[15]，见附件 1），所持观点与之不同，既然要修正，何不把等势面缩小，再缩小，直到缩小为最小的一个等势面，就是一个引力势为零的区域，修正（steering）钟面时间的计算过程，在中国方案和 BIPM 调查问卷选项 2 里都是绕不开的过程，所不同的是把修正高程，变成了到质心原点的引力势修正。有人质疑质心原点的引力势不为零，本规范编制组用费雷内坐标系概念解释了这个问题。《中国科学 物理学 力学 和天文学》论文“基于广义相对性原理的月球与地球时间转换”提出了费雷内坐标系定义，给出了原时到坐标时换算方法，也给出了月球质心坐标时到地球质心坐标时的转换关系^[16]。不同位置的守时装置，只要获知本地引力势，修正相对论效应的影响，就能把钟面时间修正到质心原点，复现坐标时。该方法与 BIPM 调查问卷中的选项 2（Option 2, 02）方法之间可以相互转换。

第三种实现方法，称为去中心化（或分布式）守时法。该方法详见附录 B，是适合于月球、火星等天体质心坐标系的通用方法，特点是，溯源到 SI 秒，收敛到约定的坐标系原点和原点处的坐标时，计量管理机构（或其他权威机构）仅负责分配和批准守时装置的编号和入门资格。让守时装置两两比对，而他们形成的钟差表格是最重要的、最稀缺的计量管理资源。2025 年 10 月的 BIPM 调查问卷中的选项 1（Option 1, 01）把月球质心坐标时定义为标准时间，认为优点是符合物理规律，缺点是无法在坐标原点或无穷远点实现真实的物理时钟。中国方案提出的去中心化守时方法克服这个缺点，与 BIPM 问卷中的选项 1 有少许不同，区别在于哪个坐标系？一个是费雷内坐标系，另一个是 LCRS 坐标系，参考遥远恒星或地球是否旋转？可分彼此。

相对时间观是地球以外时间规则的理论基础，用 SI 秒定义测量本地原时，再通过相对论转换系数，计算坐标时，在局域可以通过约定坐标原点，约定坐标时的方法实现局域的时间统一，为支撑月球标准时间定义，《中国科学 物理学 力学 和天文学》论文“地球以外的时间规则-以月球守时授时为例”提出了四维时空同时性原理

和去中心化的守时方法。

预期达到的效果：

首先，在国际热议月球标准时间定义的形势下，在美国是“阿尔特弥斯”计划与中国的“月球国际科研站”计划激烈竞争的态势下，率先提出中国方案，用创新的理论和方法引领月球时间规则；

其次，争夺月球时间计量管理（权威机构）和国际标准的话语权，掌握紧缺的计量管理资源，为构建人类命运共同体，创造人类文明新形态贡献力量；

第三，确立空间计量领域的引领地位，为地球以外时间规则，包含火星等天体局域内的时间规则，以及太阳系内脉冲星复现坐标时的规则等奠定基础；

最后，去中心化（或分布式）守时法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，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。

编制工作组

2026年9月12日

附录A：月球时间计量的中国提案

Statements on the time metrology on the Moon（关于月球上时间计量的提案）

Recalling that（依据文件）

- a) 国际天文学联合会（IAU）2024 年出台决议，定义了月球天球参考系 LCRS，同时，建议国际相关组织讨论月球标准时间的定义，

Considering that（背景和需求）

- b) 月球上开展科研、采矿、旅游的时代即将到来，统一的月球时间是在月球表面及其附近轨道上开展导航、定位和授时的技术基础，急需在月球上建立独立于地球的时间计量体系，
- c) 相对论理论和空间科学试验都已经证明原子钟的走速受引力场和相对运动速度影响，月球上的原子钟比地球上的原子钟走速快，因此，地球上的标准时间不能直接用于月球，
- d) 广义相对论是月球时间规则的基本理论，其中原时和坐标时概念，在月球上，其定义需要更清晰的表述，
- e) 仅依靠一个基本单位，SI 秒，是不能满足时间用户需求的，为了更方便地使用时间，必须在月球上定义更大的时间单位，类似于地球上的“年月日”，
- f) URSI CIE Commission A 组织了中国的学者们，包括天文、航天、时间频率计量等领域，讨论了月球时间规则问题，提出了月球时间计量体系的构建途径，

noting that（知识背景和理论依据）

- g) 时间与空间不可分割，统一时间之前，先要统一空间，在约定了同一个空间坐标系的前提条件下，再把守时装置的历表（ephemeris）作为已知参数，不同局域的原时才能换算到坐标时，但是历表是存在不确定度的，调节各守时装置的历表的过程，也就是约定同一个空间坐标系的过程，
- h) 虽然 IAU 定义了 LCRS 参考系，让其坐标轴的方向相对于遥远星体不旋转，然而，为保持 LCRS 坐标轴指向遥远星体，LCRS 需要在沿着两个椭圆轨道运动的过程中，保持非自由旋转，且转速与在这两个椭圆轨道上的位置相关，转速不是均匀的，这两个椭圆轨道运动分别是：月球绕地球运动，和地球-月球质心绕太阳的运动，在后牛顿引力势理论 PN 中，这种非自由的旋转被理解为引力潮汐的作用，然而，依据广义相对性原理，让能量守恒、角动量守恒和开普勒定律等物理规律在月球质心坐标系的局域内成立，需要约定一个更加符合自由落体运动的质心参考系，作为统一时间的前提条件，进一步让 LCRS 坐标系的坐标轴指向沿着测地线切向，或速度矢量方向，再让另外两坐标轴在子午面内，就构成了新的 LCRS 坐标系，简称 α -LCRS 系，
- i) 月球标准时间既可以定义在月球表面的某个等势面上，也可以定义到月球质心坐标系 α -LCRS 的原点，虽然 α -LCRS 坐标系原点的坐标时不能直接测量，但是不在原点上的时钟，测量原时再转换为坐标时，这与不在等势面上的时钟，测量原时再转换到等势面的所谓标准时间，是相同的过程，也是相同的原理。为了避免定义等势面的争议，将等势面缩小，再缩小，直到缩为最小区域，区域内包含质心原点，因此，月球标准时间定义到质心坐标系的原点最为合适，

- j) 从原时转换到坐标时，用广义相对论可推导出转换算法，尤其在 α -LCRS 坐标系内自由落体的时钟，其原时与坐标时之间存在常数转换关系，类似于 IAU 决议中的地球质心坐标时 TCG 与太阳系质心坐标时 TCB 之间的转换公式 $TCB = (1 - L_G) TCG$,
- k) 时空的同时性原理，在全球卫星导航 GNSS 系统中已经有成功的案例，时间戳是广播天线的四维坐标值，包含三维坐标和一维时间，时空的同时性原理要求每颗卫星广播的时间戳，假设在真空中传播，到达坐标原点的时刻，原点坐标时与时间戳时间的差值等于距离延迟，即原点处假想的时钟测量原点坐标时，其钟面时间减去时间戳的坐标时，钟差应等于广播天线到原点距离的延迟时间，**对于所有时钟来说原点坐标时是唯一的**,
- l) 多个时钟哪个更准的问题，就成为计量管理的问题，约定法是计量溯源性的最终解决方法，约定法的理论基础是平权，技术基础是两两比对，计量管理的对象是具有守时功能的装置，称为守时装置，每个守时装置功能至少包括：测量原时，计算坐标时，两两比对，广播坐标时、检查和调节历表、检查和调节转换系数等，用约定规则的方法对守时装置的数量和状态进行管理，
- m) 仿照人们在地球上观测天象，产生年月日历法的过程，假想月球上有观测者，也能观察地球的朔望、地球的自转、日出日落以及太阳与星空背景相对运动的等天象，命名这些天象，把这些天象周期作为较长时间间隔的计时单位，

Recognizing that（进一步推论）

- n) 谁都不可能自认为自己就是绝对的空间基准和时间标准，需要一种去中心化的检查和调节机制来约定的时空基准，为了统一空间参考和时间标准，需要依据计量管理的程序指定或约定具有资质守时装置，数量至少 4 台，分布在月球表面或者环月轨道上，联合守时的方法有很多，去中心化的守时方案具有简单的形式，举例如下，
- o) 初始状态下，各守时装置的历表是已知的，但都具有一定的不确定度，需要通过相互比对的方法，检查出哪一个守时装置的历表偏离平均值最大，偏离最大者应该调节，
- p) 两个守时装置的原时测量值，不能直接比对，需要转换为坐标时，再加上本装置到坐标原点之间距离的时间延迟，形成原点坐标时，相互发送和接收各自的原点坐标时，当通信链路对称时，可抵消路径延迟，获得原点坐标时的钟差比对数据，处理和计算这些钟差比对数据，及其历史变化速率，即可检查出变化最大的守时装置，或者偏离平均值最大者，同时只有一个守时装置可以调节，其它守时装置保持原状态，
- q) 广播坐标时应把广播天线的坐标数值绑在一起，构成时间戳，一同广播，用户接收到 4 个及以上的守时装置的时间戳，即可计算出自己的位置信息，算法如同 GNSS，
- r) 当地球、月球和太阳三点近似一条直线时，这个现象是地球和月球上观测者们同时可见的，即月朔望、地球朔望是具有同时性的天象，此天象是地球和月球历法关联的桥梁，月球上的时间计量还包括月球的历法规则，
- s) 地球时间与月球时间不存在固定的换算关系，短时间内可以列出对照表，或者测量或预测一定范围的对照时间，

Recommends that（陈述建议）

1. 守时方面：月球标准时间定义为“月球质心坐标时”；应该约定守时装置的基本条件和授权程序；
2. 授时方面：应该约定授时频率、带宽和调制解调规范，规定报文信息内容和格式；
3. 时间信息方面：时间信息应满足不同时间用户需求，包含但不限于，月球历法（计时单位），月球坐标时（单位 SI 秒），发射天线位置坐标，时间起点标记，月球与地球的时间历法对照表。

附录 B 去中心化的守时方法

B.1 条件

1. 有 4 个及以上的守时装置，分布在月球表面和近月轨道的不同位置；
2. 守时装置能独立地复现 SI 定义，测量本地原时；
3. 守时装置已知轨道参数历表，且历表可调节；
4. 守时装置能将本地原时转换到坐标系原点处的坐标时，且转换系数可调节；
5. 守时装置之间能直接或间接通信，建立两两双向比对时间的信道；
6. 守时装置能够存储系统内所有自己和其他两两比对数据；
7. 守时装置能够广播天线相位中心的时间戳；
8. 守时装置编号以及在两两比对表格中的位置，由管理机构赋予。

B.2 步骤

B.2.1 测量原时

分布在坐标系中的不同位置的 4 个及以上的守时装置，已知历表。每个守时装置复现国际单位制 SI 秒定义，测量原时 τ_i ， $i=1,2,3,4,\dots$ 表示不同编号的守时装置。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。

B.2.2 计算原点坐标时

每个守时装置计算原点位置处的坐标时，如公式 (4)，

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

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，和此时此刻守时装置广播天线相位中心到原点的距离； k_i 为原时到坐标时转换系数； t_{0i} 为初始偏离量； c 为光速。

B.2.3 两两比对

守时装置两两比对，生成钟差数据，计算如公式(5)，形成列表，见表 B.1。

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

式中: Δt_{ij} 为守时装置 i 与 j 的原点坐标时之差； i, j 为守时装置的编号， $\Delta t_{ij} \neq \Delta t_{ji}$ 表示两次不同的比对值。表格第 i 行，第 i 列填入第 i 个守时装置的初始偏离量 t_{0i} 。

表 B.1 第 m 次遍历两两比对钟差列表。

第 m 次	守时 1	守时 2	守时 3		守时 n
守时 1	t_{01}	Δt_{12}	Δt_{13}		Δt_{1n}

守时 2	Δt_{21}	t_{02}	Δt_{23}		Δt_{2n}
守时 3	Δt_{31}	Δt_{32}	t_{03}		Δt_{3n}
...				t_{0i}	
守时 n	Δt_{n1}	Δt_{n2}	Δt_{n3}		t_{0n}

新数覆盖旧数保留最新数据。受通信链路和存储容量限制，对比对频次和数据量的要求是：

1. 应保证在最小历表周期内遍历至少两次；
2. 存储容量应保证在最大历表周期中保存所有遍历数据。

每个守时装置要求保存完整两两比对列表，包括与自己无关的。每次遍历的数据量为 n^2 ，见表 1, n 是管理机构赋予的守时装置总数，管理机构分配守时装置的序号。

两两比对技术方法为双向通信链路，如中继卫星，或激光直连，本规范不涉及比对所用到的技术细节，但通信链路不对称和噪声引入的测量不确定度，成为总测量不确定度的来源之一。

B.2.4 检查钟差变化率调节转换系数

钟差变化率是指两次相邻的历史数据中，钟差数据之差，见公式(B.3)。

$$D_{ij}^{(m)} = \Delta t_{ij}^{(m)} - \Delta t_{ij}^{(m-1)} \quad i \neq j \quad (\text{B.3})$$

式中： $D_{ij}^{(m)}$ 为在第 m 次遍历表格与第 $m-1$ 次遍历表格中单元位置（行与列）相同的数据之差， $\Delta t_{ij}^{(m)}$ 为守时装置 i 与 j 的第 m 次遍历的钟差。

例如，遍历第 m 次后，守时装置 i 按公式（B.3）计算形成钟差变化率列表，如表 B.2：

表 B.2 守时装置 i 的钟差变化率列表。

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)	$\Delta t_{in}^{(m-n)}$

各守时装置从各次遍历的表 B.1 信息中抽出与自己相关的数据列成表 B.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 $\overline{D}_i^{(m)}$ ，即表 B.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：

$$\bar{D}_i^{(m)} = \frac{1}{n} \sum_{j \neq i} D_{ij}^{(m)} \quad \bar{D}_i^{(m)} \leq D_{\lim} \quad (\text{B.4})$$

式中： $\bar{D}_i^{(m)}$ 为第 m 次遍历比对后，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。

在第 m 次遍历比对之后，每个守时装置保存有数据相同的表 B.1，各自计算，筛选出不满足 (B.4) 条件的守时装置。被选出的守时装置，比如，第 i 个守时装置，调节原时到坐标时转换系数 k_i ，调节后继续保持后续的两两比对遍历操作，在表 B.1 中仍占有原来的位置，继续产生新的钟差比对数据。调节 k_i 后，参照新手加入程序，修改表 B.1 的第 i 行第 i 列赋值为初始化时间 t_{0i} ，按(B.5)计算。

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

$$t_{0i} = \Delta \bar{t}_j = \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i} \Delta t_{ij} \quad (\text{B.5})$$

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 B.1 中第 i 行的平均值，除第 i 列外。

如何调节 k_i 的技术，可参考其他技术文件，本规范不限定调节的技术细节。

B.2.5 检查偏离调节历表参数

按照“偏离平均值最大”的原则选出调节对象。计算表 B.1 中的偏离平均值，见公式(B.6)。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(B.7)。

$$\Delta \bar{T}_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n |\Delta t_{ij}| \quad (\text{B.6})$$

$$M = \left\{ M \mid \text{if} \left(\Delta \bar{T}_M \right) = \max \left(\Delta \bar{T}_i, i = 1, 2, \dots, n \right) \right\} \quad (\text{B.7})$$

$$\Delta \bar{T}_M > T_{\lim} \quad (\text{B.8})$$

式中： $\Delta \bar{T}_i$ 为表 B.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； 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； $\Delta \bar{T}_M$ 为第 M 行钟差绝对值的平均值； $T_{\lim}$ 为偏离量限值。

超偏者应调节其历表中广播天线相位中心位置到坐标系原点的距离 $|R_i|$ ，直至满足偏离量限值要求，见(B.8)。

偏离平均值最大原则，是指在钟差数据表，表 B.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。

初始化时，设定为 $T_{lim}=2\Delta T_M$ 。

在第 m 次遍历比对之后，每个守时装置保存有数据相同的表 B.1，各自计算，在满足 B.2.4 条件后，再筛选超偏者，同时只有一个超偏者进行调节，其他守时装置保持不变。

B.2.6 广播时间戳

计算广播坐标时，播发时间戳。守时装置的广播天线相位中心的四维坐标值，即时间戳，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。

$$t_{ix} = t_i - \frac{|R_i|}{c} = t_{0i} + (1 + k_i)\tau_i \quad (B.9)$$

式中: t_{ix} 为广播坐标时，其他同公式(B.1)。

B.3 收敛

以上六个步骤是去中心化的守时方法，包括了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，直到时间比对表格的数据等于时钟最大不确定度区间为止。

附录 C 授时方法

C.1 授时装置与守时装置的区别

授时装置负责将标准时间传递给时间用户，授时装置是守时装置的时间用户。时间用户既可以接收守时装置的广播信号，也可以接收授时装置的广播信号。可参照与地球上标准时间的守时与授时类似的综合模式实现，见图 C. 1。

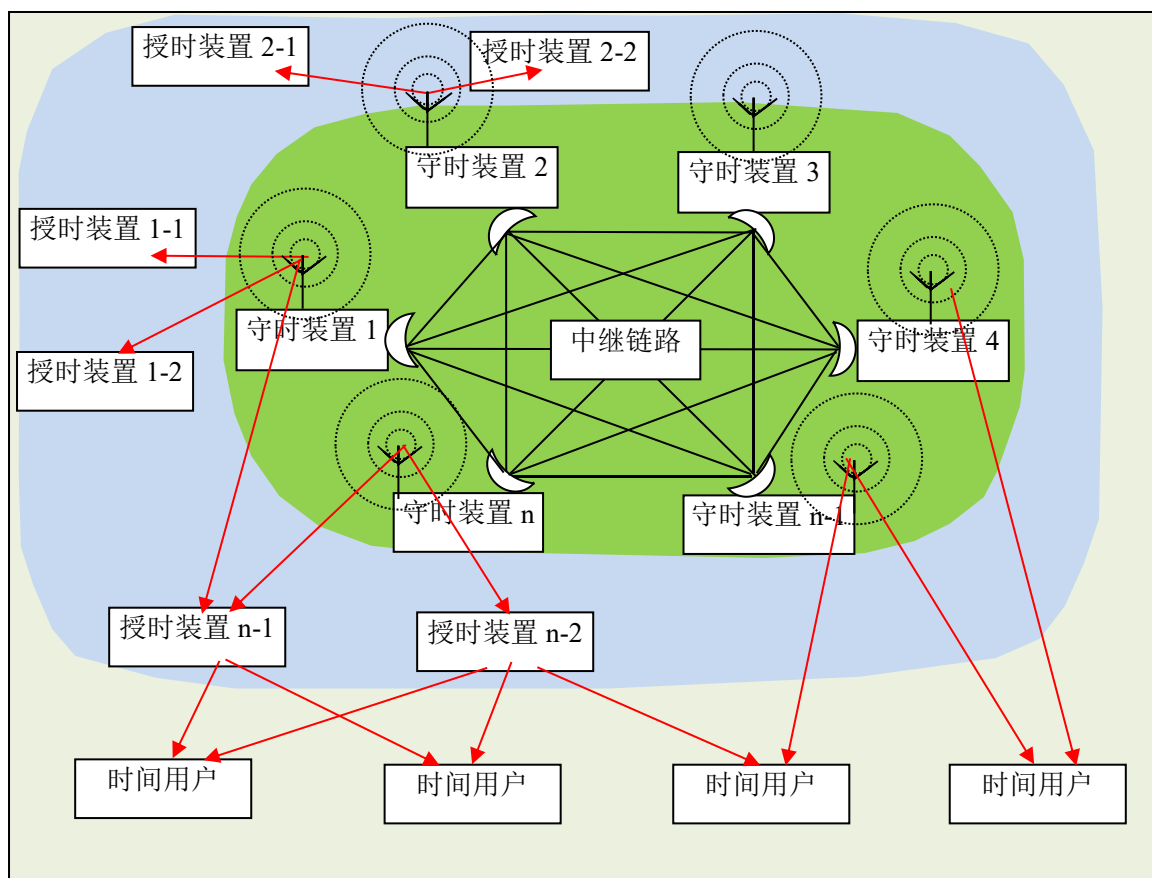


图 C. 1 守时装置与授时装置以及时间用户的关系

授时装置与守时装置相比有以下不同之处：

1. 授时装置无需复现 SI 秒定义，应保持时钟短期稳定性，稳定性指标应优于 $1\text{E-}12/1\text{s}$, $1\text{E-}13/100\text{s}$, $1\text{E-}14/1275696\text{s}$ ，即半个朔望地球期间变化不超过 13ns；
2. 授时装置无需与其他装置两两比对，没有比对天线，能接收广播信号。其时钟可调节或被驯服，要求与标准时间同步，同步方法可参照 C. 3 节中第二类时间用户；
3. 授时装置的历表，以守时装置的时间戳为基准，由第二类时间用户的定位算法获得，实时更新；
4. 授时装置的广播天线播发天线中心位置处的时间戳，其历表位置和时间作为

其他时间用户的输入；

5. 授时装置的数量和位置没有限制，守时装置的编号和技术资格由计量管理机构授权管理。

C.2 第一类时间用户

第一类时间用户对时间同步的要求在 1ms 量级（光传播距离大于月球半径的 17%）以上，直接接收距离最近的标准时间广播信号，以接收到的最新时间戳中的数值为标准时间，赋值给时间用户自己的时钟，或直接使用该标准时间，也称为“最新鲜原则”。

C.3 第二类时间用户

第二类时间用户对时间同步的要求在 10ns 量级（光传播距离大于 3m）以上，接收广播信号，获得来自 4 个不同位置的时间戳，进行方程（C.1）解算，获得时间用户的时间和空间位置。

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (x-y_1)^2 + (x-z_1)^2 = c^2(t-t_1)^2 \\ (x-x_2)^2 + (x-y_2)^2 + (x-z_2)^2 = c^2(t-t_2)^2 \\ (x-x_3)^2 + (x-y_3)^2 + (x-z_3)^2 = c^2(t-t_3)^2 \\ (x-x_4)^2 + (x-y_4)^2 + (x-z_4)^2 = c^2(t-t_4)^2 \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

式中： (x,y,z,t) ——时间用户的四维坐标；

(x_i,y_i,z_i,t_i) ——第 i 位置的时间戳， $i=1, 2, 3, 4$ ，授时装置或守时装置广播天线相位中心处的四维坐标；

此类时间用户应具有同时接收 4 个时间戳信号的能力，并能解算方程（C.1），从而获得坐标系上的位置和时间，也称为“时空定位原则”。

C.4 第三类时间用户

第三类时间用户对时间同步的要求在 0.1ns 量级（光传播距离大于 3cm）以上。仅在局域内部使用光纤、激光或射频链路实现频率同步，局域之外参照第二类时间用户方法与标准时间同步，有一个接收器按第二类时间用户溯源到标准时间，其余时间用户以该接收器为局域内部基准。局域范围限定在光纤、激光或射频直接链路范围以内。不同局域之间要求与标准时间同步。

参考文献

- [1] Draft Resolutions of General Conference on Weights and Measures (28th meeting) 13-15 October 2026 [EB/OL]. (2026-06-30)[2026-9-10]:(33pp), <https://www.bipm.org/fr/cgpm-2026/documents>
- [2] 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[J]. 中国科学 物理学 力学 天文学, 2026, 56(3):239512(12pp).
- [3] Resolution of the XXXII IAU General Assembly to establish a standard Lunar Celestial Reference System (LCRS) and Lunar Coordinate Time (TCL) [S/OL]. (2024-09-18) [2026-09-10]. https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2024_Resol2_English.pdf.
- [4] Resolution on the establishment of a coordinated lunar time standard by international agreement[S/OL]. (2024-09-18) [2026-09-10]. https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2024_Resol3_English.pdf.
- [5] Kopeikin S M, Kaplan G H. Lunar time in general relativity. *Phy Rev*, 2024, 110(8): 084047(29pp)
- [6] Ashby N, Patla B R. A relativistic framework to estimate clock rates on the Moon and beyond[EB/OL]. (2024-9):(14pp), <https://arxiv.org/abs/2402.11150v1>.
- [7] Slava G. Turyshchev, James G. Williams, Dale H. Boggs, and Ryan S. Park. Relativistic Time Transformations between the Solar System Barycenter, Earth, and Moon[EB/OL]. (2024-11-3):(19pp), arXiv:2406.16147v4
- [8] A. Bourgoïn, P. Defraigne, F. Meynadier. Lunar Reference Timescale[EB/OL]. (2025-11-4):(9pp), arXiv:2511.02709v1.
- [9] MOLLI S, FIENGA A, DEFRAIGNE P, etc. NovaMoon: A Strategic Lunar Reference Station for Positioning, Timing, and Largely Enhanced Science in the Earth–Moon System[EB/OL]. (2026-05-18):(64pp), <https://arxiv.org/pdf/2602.08432>
- [10] Xu Lu, Tian-Ning Yang, and Yi Xie. Lunar Time Ephemeris LTE440: User Manual[EB/OL]. (2025-7-25):(5pp), arXiv:2506.19213v2
- [11] Tian-Ning Yang, Ren-Fang Geng, Yi Xie. Two birds with one stone: Simultaneous realization of Lunar Coordinate Time and lunar geoid time with a single orbital clock[EB/OL]. (2026-2-21):(4pp), <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202558803>
- [12] 尹东山. 月球时间基准[C]. 第四届北斗规模应用国际峰会深空与月球导航技术学术交流会, 2025年9月25日湖南株洲
- [13] Yin Dongshan. Conceptual Framework for Lunar Time[C]. Workshop on Cislunar PNT, Vienna International Centre, from 11 to 13 February 2025
- [14] 刘民, 平劲松, 余和真. 月球标准时间定义及其复现方法[C]. 2026年中国航天大会论文集, 成都, 2026-04-23. 中国宇航学会, 2026:(9pp)
- [15] Group of Lunar Time Metrology. Discussion of Lunar Time Standards[C]. //2025 URSI Asia-Pacific Radio Science Meeting (AP-RASC), Sydney, Australia, IEEE, 2025:(4pp), doi: 10.46620/URSIAPRASC25/WUJM3044
- [16] 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[J]. 中国科学 物理学 力学 天文学, 2026, 56(6):269511(9pp)..