引文格式:丛佃伟,鄢建国,吴富梅,等.我国月球空间基准建立、维持方法及其发展思考[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(8):1620-1629.DOI:10.13203/j.whugis20260116

Citation: CONG Dianwei, YAN Jianguo, WU Fumei, et al. Establishment, Maintenance Strategies and Developmental Reflections on China's Lunar Spatial Reference Framework[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(8): 1620-1629.DOI:10.13203/j.whugis20260116

我国月球空间基准建立、维持方法及其发展思考

丛佃伟[1] 鄢建国[2] 吴富梅[3,4] 王重阳[2] 杨婉羚[2]

1 航天工程大学,北京,101416

2 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079

3 空间基准全国重点实验室,陕西 西安,710054

4 西安测绘研究所,陕西 西安,710054

摘 要:随着月球探测从短期考察迈向长期驻留与资源利用新阶段,构建高精度、统一且自主的月球空间基准体系已成为支撑我国月前科学研究、工程实施与国际协作的迫切需求。现有的月球空间基准存在参考框架不统一、控制点稀疏且分布不均、物理高程基准缺乏等问题。从月球参考框架与控制网、高程基准以及月球重力场、月球历表方面系统阐述了当前月球空间基准的概念和发展历程,重点讨论了建立与维持月球空间基准的关键技术与方法;在此基础上,系统总结了现有的月球空间基准面临的问题和挑战,并探讨了月球空间基准未来的发展路线,旨在为我国未来国际月球科研站及地月通导遥一体化建设提供理论支撑。

关键词:月球空间基准;月球重力场;月球控制网;月球大地水准面;月球高程基准

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-04-08

DOI:10.13203/j.whugis20260116 **文章编号**:1671-8860(2026)08-1620-10

Establishment, Maintenance Strategies and Developmental Reflections on China's Lunar Spatial Reference Framework

CONG Dianwei[1] *YAN Jianguo*[2] *WU Fumei*[3,4] *WANG Chongyang*[2] *YANG Wangling*[2]

1 Space Engineering University, Beijing 101416, China

2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 State Key Laboratory of Spatial Datum, Xi'an 710054, China

4 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: As lunar exploration transitions from short-term detection missions to long-term lunar habitation and in-situ resource utilization, the establishment of a high-precision, unified, and autonomous lunar spatial reference system has become an urgent requirement to support China's lunar scientific research, engineering implementation, and international cooperation. The existing lunar spatial reference systems are plagued by core limitations including inconsistent reference frame specifications, sparse and unevenly distributed control points, and the absence of a unified physical elevation datum. The fundamental concepts and full development history of mainstream lunar spatial reference systems are systematically elaborated, with coverage of core components including lunar reference frames and control networks, elevation datums, lunar gravity field models, and lunar ephemerides. The key technologies and implementation approaches for the establishment and long-term maintenance of high-precision lunar spatial reference systems are emphatically discussed. On this basis, the outstanding problems and critical challenges facing existing systems are systematically sorted out, and the future development roadmap of lunar spatial reference systems is mapped out, to provide solid theoretical support for the construction of China's upcoming interna-

基金项目:国家自然科学基金(42241116,42595542,42388102,42327802);国家重点研发计划(2022YFF0503202)。

第一作者:丛佃伟,博士,副教授,研究方向为大地测量。congdianwei@sina.com

通信作者:鄢建国,博士,教授。jgyan@whu.edu.cn

tional lunar research station, as well as the development of an integrated Earth-Moon communication, navigation, and remote sensing system.

Key words: lunar spatial reference framework; lunar gravity field; lunar control network; lunar geoid; lunar elevation datum

月球是距离地球最近的自然天体,是人类最早开展深空探测活动的天体,也是未来深空探索体系中的中继节点[1-2]。自20世纪中期以来,人类通过轨道跟踪、遥感影像、就位探测与样品返回等多种方式,对月球开展了持续而系统的探测研究,极大推动了对月球起源、内部结构及其演化过程的认识[3]。进入21世纪后,月球探测活动进入高频次、高精度和多目标并行的新阶段,美国、欧洲、日本、印度和中国相继实施了多项月球探测任务,为获取不同类型的高精度月球观测数据奠定了基础。

近年来,美国实施了月球勘测轨道器(lunar reconnaissance orbiter,LRO)和重力恢复与内部结构实验室(gravity recovery and interior laboratory,GRAIL)等任务[4-5],实现了月球全球高分辨率地形测量与高精度重力场反演;欧洲航天局开展了SMART-1任务,对月球表面矿物组成与形貌特征进行了系统探测[6];日本的SELENE和SLIM任务[7-8]以及印度的Chandrayaan-1~3任务[9]在月球地形、重力和资源探测方面取得了重要成果;中国实施的嫦娥一号至嫦娥六号任务完成了月球全球探测、正面与背面着陆以及样品返回等关键目标,取得了一系列具有国际影响力的科学成果[10-12]。这些探测任务显著提升了月球观测数据的空间分辨率和测量精度,也对月球空间基准体系提出了新的要求[13]。中国嫦娥工程已圆满完成“绕、落、回”三步走战略,成功实现世界首次月球背面软着陆,并获取迄今最年轻的月球火山岩样品[14]。未来,嫦娥七号和嫦娥八号任务将重点面向月球南极区域开展高精度着陆、极区环境与资源探测以及关键技术验证,为国际月球科研站建设提供技术支撑[3,11,15]。同时,中国计划于2030年前后实施载人登月任务,对月球进行长期、系统的科学考察[16]。

随着月球探测活动向高精度、多任务和长期运行方向发展,对统一、稳定且可扩展的月球空间基准的需求日益迫切。美国主导的LunaNet计划[17]和欧洲主导的Moonlight计划[18],其目的都是为月球探测活动提供通信、导航和授时服务,中国也提出了“鹊桥综合通信、导航和遥感星座”[19],该星座计划分3个阶段完成,旨在为月球附近的运行以及月球表面探索活动提供中继通信、导航、定位和定时服务。中国国际月球科研站计划、美国Artemis计划均明确提出需要高精度的月球参考系和统一的时空基准作为支撑条件。基于上述背景,本文系统回顾了月球空间基准概念及发展历程,总结了当前月球空间基准的主要构建方法及其测绘与测地支撑技术,并在此基础上分析了未来月球空间基准的发展趋势与关键技术问题,以期为后续月球测绘与深空探测任务提供参考。

1　月球空间基准的概念与意义

月球空间基准是用于统一描述和表达月球空间信息的基础参考体系,主要包括月球参考系和高程基准等要素[20]。月球空间基准的具体实现需要依托高精度月球参考框架、月球历表、重力场模型、全球数字高程模型(digital elevation model,DEM),以及由月面激光反射器和着陆器无线电应答机构成的控制点网络[21-23],其核心目标是在统一的物理与数学框架下,精确表达月球表面及近月空间目标的位置和运动。

月球空间基准是月球科学研究和探测工程实施的基础条件,对多源月球数据的精确配准、高精度制图以及月球内部结构和地月系统动力学研究具有决定性作用。月球内部结构演化、表面地质过程及极区挥发物分布等科学研究需要多源观测数据在统一月球空间基准下展开;而精确着陆、自主导航、月面制图、地月往返任务等工程应用对月球空间基准的精度和稳定性提出了更高要求。随着月球探测活动由科学探测向工程应用和长期驻留转变,建立精确、统一且稳定的月球空间基准已成为实现高精度着陆、月面导航、资源勘查和基础设施建设的重要前提,同时也是构建月球导航、授时与通信服务体系的关键基础,其完善程度将直接影响未来载人登月、国际月球科研站运行及深空探测活动的安全性与可持续性。

2　月球空间基准发展历程

在天基探测方法之前,月球空间基准主要依赖地面光学望远镜观测。18世纪中期,德国天文学家Tobias Mayer等基于卡西尼定律(1693年)建立了

以月球几何中心为原点、采用平均自转参数(忽略物理天平动)的平均地球/极轴参考系(mean earth/polar axis,ME)[24]。这一阶段以月表可辨识大型地貌为相对定位基准,精度受观测条件限制,存在质心与几何中心不分、无全球统一高程及重力场基准的核心缺陷,仅能支撑低精度二维制图。

阿波罗时代标志着月球基准从几何描述向动力学模型的飞跃。美国的Apollo 11、Apollo 14和Apollo 15任务和苏联的Lunokhod 1和Lunokhod 2月球车在月球表面安置了5个激光反射镜[23],这些反射镜为研究月球自转以及将这些自转与月球轨道运动和地壳动力学效应区分开来提供了有利条件[25]。月球激光测距(lunar laser ranging,LLR)通过测量激光往返时程确定收发端距离,目前测距精度已达1 cm[26]。基于高精度LLR数据,研究人员解算获得了月球轨道、惯性主轴及物理天平动参数[27],确立了以月球质心为原点、对齐惯性主轴的PA(principal axis)参考系。代表性成果主要包括美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory,JPL)发布的DE(development ephemerides)系列历表[21]、法国巴黎天文台的INPOP(Intégrateur Numérique Planétaire de l'Observatoire de Paris)系列历表[28]和俄罗斯应用天文研究所发布的EPM(ephemeris of planets and the moon)系列历表[29]。为了适应高精度轨道动力学计算,时间系统从传统的世界时转向了考虑相对论效应的质心力学时。此外,DAVIES等[30-31]以月球激光反射器、ALSEP(Apollo lunar surface experiment packages)站点米级坐标为绝对控制,建立ME系下月球正面首个统一控制网,拓展至月背与极区,建成百米级精度的统一月球控制网(unified lunar control network,ULCN)。LLR数据为月体质心、自转参数、地月系统演化等研究提供了高精度约束[32]。这一阶段月球基准完成了从纯几何到动力学和物理模型耦合的技术演进,为后续参考系严格定义奠定了基础;但激光反射器数量与分布的局限[33]使其对全月基准的约束能力不足,无法支撑高分辨率全月制图需求。

20世纪90年代,随着Clementine和Lunar Prospector等轨道探测任务的实施,月球空间基准进入以轨道探测为主导的发展阶段。ARCHINAL等[34]结合Clementine遥感影像以及先前的控制网构建了ULCN2005控制网。2007年日本宇宙航空研究开发机构(Japan aerospace exploration agency,JAXA)发射的"月女神"(selenological and engineering explorer,SELENE)任务通过四程测量技术,显著提升了月球背面重力场的反演精度,弥补了早期重力场模型在背面的重大缺陷[35]。研究人员首次获得了具有全球覆盖意义的月球重力场模型,并据此改进了月球坐标系统和参考参数。随着美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)的LRO任务的开展,月球空间基准得到了进一步发展。LRO任务搭载的月球轨道器激光测高仪(lunar orbiter laser altimeter,LOLA)首次实现了对月球表面形状的高精度测量,为月球高程基准提供了前所未有的数据支撑[4]。FOLKNER等[36]利用不同来源的探测数据构建DE421历表。NASA于2011年[5]发射的GRAIL任务通过双航天器编队飞行和高精度的Ka波段星间测量技术,实现了对月球重力场的超高精度测量,分辨率和球谐阶次均大幅优于以往任务。中国嫦娥系列探月工程走出了自主可控的月球空间基准建设技术路径,实现了一系列关键核心突破:利用嫦娥一号、二号任务获取中国首套全月地形数据[37-39]与重力场数据[40-42],填补了中国月球基准数据空白;嫦娥三号至嫦娥六号着陆任务实现月面软着陆与月背巡视探测[43-46],突破月背测控与基准传递核心技术。DI等[47]融合多源高分辨率轨道影像与中国嫦娥二号探测数据,构建了新一代月球全球控制网(lunar global control network,LGCN)2025。LGCN2025控制网包含超150万个三维控制点,全球水平平均定位精度达20 m,垂直精度约为3~4 m,与SLDEM2015一致,较传统ULCN2005实现了显著的精度跃升,为月球高精度测绘与深空探测任务提供了全新的标准化基准支撑,进一步强化了中国月球基准的自主可控能力。

近年来,随着嫦娥系列、Artemis计划以及多国探月任务的推进,国际月球探测活动已进入以资源利用为目标的新阶段。精确着陆、月面导航、资源勘查和基础设施部署等任务,对月球空间基准的一致性、可维护性和国际通用性提出了更高要求。为了满足未来月球探测任务的工程需求,国际天文学联合会于2024年[48]正式确立了月球天球参考系(lunar celestial reference system,LCRS)及月球坐标时(lunar coordinate time,TCL),标志着月球空间基准从科学研究模型转变为高精度的深空基础设施。

目前,月球空间基准建设仍处于初级阶段,主要面临参考框架不统一、控制点稀疏且分布不均、物理高程基准缺乏等核心问题,各国正加快

竞争未来月球基准设施的定义权与标准主导权。推进独立自主的月球空间基准体系成为中国实现长远月球探测与利用的必然选择。高精度月球空间基准不仅是保障月球科研站等重大工程安全实施、支撑月球资源精确勘探与可持续开发的基础,也是维护未来月面战略资产安全、确保地月空间行动自主性、避免在关键领域受制于人的重要基石。因此,突破相关核心技术,构建自主可控的月球空间基准,对于维护国家太空利益、掌握深空发展主动权具有不可替代的战略意义。

3　月球空间基准建立方法

3.1　月球参考框架和控制网

月球参考框架体系主要包括月球天球参考框架(其理论系统可称为LCRF/LCRS(lunar celestial reference frame/system)和国际月球参考框架(international lunar reference frame, ILRF)。LCRF是一个原点位于月球质心、坐标轴方向与国际天球参考框架(international celestial reference frame,ICRF)保持无旋转对齐的惯性参考系,用于描述航天器在月球附近的惯性空间运动[20]。ILRF则是月固参考系的标准实现,在具体构建时通常基于两种不同的物理基准定义坐标轴方向:PA与ME。

PA参考系由月球的3个最大主惯性轴作为坐标轴方向,其定义直接源于月球的惯性张量特性。在ME参考系中,Z轴为月球自转轴,X轴指向平均地球方向。两种参考系的原点均位于月球质心,它们之间通过微小的天平动角相互关联[20]。由于月球重力场存在显著的不对称性,导致PA参考系与ME参考系存在空间上的差异。具体而言,月球的引力位系数中在纬度上为偶次、在经度上为奇次的项(如S_{31}和S_{33}等)会导致X和Y主惯性轴绕Z轴发生恒定旋转,使得X主惯性轴在经度上偏离平均地球方向;而在经度上为偶次、在纬度上为奇次的位系数(如C_{30}和C_{32}等)则会导致X和Z主惯性轴绕Y轴发生恒定旋转,使得Z主惯性轴偏离平均自转轴,X主惯性轴在纬度上偏离平均地球方向,因此PA参考系的具体指向依赖于所采用的月球重力场模型[23]。以DE430历表为例,PA参考系(记为P)与ME参考系(记为M)可通过下式进行转换[20]:

$$\begin{cases} M=\boldsymbol{R}_x(-0.30'')\boldsymbol{R}_y(-78.56'')\boldsymbol{R}_z(-67.92'')P \\ P=\boldsymbol{R}_z(67.92'')\boldsymbol{R}_y(78.56'')\boldsymbol{R}_x(0.30'')M \end{cases} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{R}_x$、$\boldsymbol{R}_y$、$\boldsymbol{R}_z$分别表示绕x、y、z轴的右手坐标系的标准旋转矩阵。由于月球内部质量的不均匀导致两个月固坐标系并不重合,两种坐标系在月球表面的偏移量大约为860 m[20],这种差异在20世纪60年代通过轨道动力学分析首次被明确认识,并被证明对月球定位、制图和多源数据融合具有重要影响。因此,在月球空间基准研究和应用中,明确区分参考系统与参考框架,并根据具体研究目的合理选择ME或PA框架,是保证科学分析和工程应用一致性与可靠性的关键前提。ME坐标系自从18世纪对月球表面进行观测开始就已经在使用了,美国NASA的LRO任务、日本JAXA的Kaguya任务和中国国家航天局的嫦娥系列任务发布的月球的形状模型和DEM均采用了ME参考系。PA参考系在动力学和物理研究中具有重要意义,特别是在LLR分析、重力场建模以及航天器轨道确定中具有明显优势。在PA系统下,月球重力场的某些二阶非对称项(如C_{21}、S_{21}和S_{22})理论上为零,从而简化了动力学模型表达。因此,PA系统常被视为一种更具物理一致性的参考系统。NASA的JPL发布的DE历表中提供的物理天平动以及由GRAIL任务发布的月球高阶重力场模型均采用了PA参考系。参考系的选择取决于预期的应用场景。此外,PA参考系与LCRF的转换通过描述月球自转欧拉角及其变化率实现,这些欧拉角可以从历表中获取,具体的转换关系为:

$$P=\boldsymbol{R}_z(\psi)\boldsymbol{R}_x(\theta)\boldsymbol{R}_z(\phi)I \tag{2}$$

式中,I为ICRF坐标;ϕ为ICRF的X轴与月球赤道的升交点沿月球赤道的夹角;θ为月球赤道相对于ICRF赤道的倾角;ψ为月球赤道的升交点到月球从升交点到月本初子午线沿月球赤道的夹角。

建立高精度的月球参考框架,必须具备惯性系与月固系的高精度转换参数的解算能力,需要对月球的物理天平动进行精确建模。目前的物理天平动建模主要依赖于LLR数十年的数据积累,但目前对月球内部的耗散机制和高阶物理参数的认知仍有不足,限制了对物理天平动参数的高精度建模。嫦娥六号任务已经部署了月球背面的首个激光反射器,嫦娥七号和嫦娥八号任务计划在月球南极放置激光反射器[49]。未来实现月球物理天平动参数的高精度建模关键在于对多源、异构观测数据进行融合与联合解算。一方面,需要持续利用并精化对

现有月面激光反射器阵列(主要位于月球正面中低纬度)的LLR观测;另一方面,利用在月球极区等关键区域布设的新一代激光反射器优化观测几何。同时,甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry,VLBI)技术和微波测距能以独立于LLR的方式,通过观测月面信标源,提供高精度的位置信息。通过构建统一的月球动力学模型,对LLR数据、VLBI时延与微波测距数据进行联合平差,实现对月球自转参数的高精度建模。此外,还需要建立ME坐标系与PA坐标系之间精确、可逆转换关系,避免因数据更新引起坐标框架的整体漂移,保持坐标框架的长期稳定性和一致性。

目前月球表面的高精度大地测量控制网主要依赖于5个LLR激光反射器。然而,这些反射器全部位于月球正面的中低纬度区域,导致高纬度地区、极区以及月球背面缺乏高精度的地面控制点。这种不均匀分布使得不同区域的导航定位精度存在显著差异。尽管ULCN2005控制网为早期月球测绘提供了基础参考,但其基于20世纪探测数据构建,在控制点密度、绝对精度和全球一致性方面已难以适应未来高精度探测任务的需求。特别是在南极等关键科学区域,控制点的缺失严重制约了精确着陆与区域测绘的实施。此外,由于月球被地球潮汐锁定,地面测站无法直接对月球背面的探测器进行无线电跟踪,仅依赖正面观测导致几何构型强度不足,进一步限制了月球背面控制点网络的建立。

未来的月球任务可通过两种方式提高月球大地测量控制网的精度。第一是后续着陆器应搭载高精度无线电跟踪设备与激光角反射器,以增强月面定位能力;第二是轨道器任务需对历史及新布设的着陆器位置进行精确测绘[23]。中国嫦娥六号任务已在月球背面成功部署首个激光反射器,预计嫦娥七号、八号任务也将携带类似载荷。这些反射器与嫦娥三号、四号、五号等任务的着陆器的无线电应答器共同构成新一代控制点网络,通过融合卫星激光测高等多源观测数据进行全球联合平差,有望构建全月统一的高精度控制网,为月面定位导航、地形测绘及轨道器精密定轨提供支持[49]。此外,建设由环月卫星构成的月球导航通信系统(如中国的鹊桥星座、欧洲航天局的Moonlight计划及美国的LunaNet计划)也至关重要。这类系统可通过星间链路实现时空基准的天基自主维持与全球覆盖,从而根本上改善月球背面的观测条件。针对极区永久阴影区光照不足的挑战,可结合合成孔径雷达与激光测高数据开展协同观测,以提升该区域的高程测量精度与控制点定位能力。

3.2 月球高程基准与重力场

长期以来,月球高程基准缺乏如地球海平面般的全球性物理参照,通常采用半径为1 737.4 km的月球参考球面作为基准平面,以月球表面点到参考球面的径向距离定义高程。该几何高程基准在早期月球探测与制图任务中具有实现简便、计算稳定等优势,为月球DEM的构建和应用提供了统一参照。然而,在月球重力场并不对称、内部质量分布不均匀的背景下,纯几何意义上的高程基准难以反映真实的重力位能差异,其在精密测地学分析和工程应用中的局限性日益显现[50]。现有大量研究依托激光测高与摄影测量数据构建全球DEM,例如,美国月球LRO搭载的月球轨道器LOLA累计获取了超过65亿个月面高程点,其垂直精度可达0.1 m,并构建了空间分辨率约100 m的全球地形模型;日本的SELENE卫星地形相机则为极区地形测绘提供了重要补充;中国的嫦娥系列任务亦通过自主数据构建了多套DEM产品[51-53]。然而,现有月球DEM的高程值仍是相对于一个几何参考球面给出的,而非基于具有明确物理意义的月球大地水准面。

在行星测地学中,大地水准面被定义为与平均海平面最吻合的重力等位面,是连接几何地形与重力场的物理桥梁。类比于此,月球大地水准面可定义为与某一选定参考重力位值相对应的等位面,该重力位场需综合月球静态重力场、固体潮形变及离心力效应。此等位面在物理上表征了月球重力场与整体形状的动态平衡,是将几何高程转化为“物理高程”的关键。因此,构建月球大地水准面并将其确立为新一代高程基准的起算面是月球测地学发展的核心方向。这一目标高度依赖如美国GRAIL任务所获得的高分辨率、高精度重力场模型。未来,通过融合下一代重力探测数据、精度更优的星载激光测高系统(测距精度达厘米级)以及超高分辨率遥感影像,构建基于月球大地水准面的统一高程系统,将为月球科学研究、资源勘探和永久基地建设提供符合物理规律的基础垂直基准。

月球重力场是月球高程基准的动力学支撑,其精度直接决定轨道计算、质心定位与高程基准的可靠性。美国GRAIL双星任务为月球提供了空前精细的重力场,当前GRAIL任务构建的GL1800F重力场模型高达1 800阶次,全波长分辨率高达6 km[54]。这一高精度重力场极大提高了对月球内

部质量分布的认知,也为探测器的精密定轨提供基础。当前重力场研究的难点在于:如何解决模型中残留的高阶噪声(需结合更密集的地面控制点和更长的跟踪数据),以及如何实时评估时变重力(例如由月球地壳质量重分布引起的微小扰动)。未来将加强利用在轨探测(如继续使用SELENE、嫦娥系列以及未来的月球探测任务)积累的新观测数据,提升月球重力场模型低阶次解算精度;同时,结合GRAIL和未来月面任务数据,开展月球内部结构和潮汐扰动的物理反演研究,为高程基准、大地测量和导航提供更加准确的重力场支持。

3.3　月球历表

月球历表包括月球的轨道和物理天平动,是月球空间基准的重要组成部分。精确的月球历表能提供月球质心位置和定向参数,支撑导航和测量应用。目前主流的月球历表来自数值积分星历。美国JPL的DE系列历表是全球权威行星和月球历表:最新版本DE440包含公元1550—2650年的月球质心和章动角度数据,DE441则扩展到－13200至＋17191年。这些历表通过融入LLR和射电VLBI等观测数据不断更新,提供高精度的月球轨道和物理天平动参数[55]。中国研究团队同样对月球历表进行了研究,杨婉羚等[56]建立了高精度天平动模型,并利用LLR观测数据初步解算了月球历表;TIAN等[57]利用1925—2021年的行星与月球实测观测数据,研制出自主行星与月球历表PETREL19,该历表的动力学测试版本与国际主流DE430历表的对比结果显示,30年积分跨度内二者的地月距离偏差在1 cm以内,月球质心位置差异为分米级;LU等[58]发布了月球时间历表LTE440,实现了TCL与太阳系质心坐标时、质心力学时的高精度转换,2050年前时间转换精度优于0.15 ns,长期漂移率不确定度达7×10^{-20}。

月球历表的构建以动力学建模为核心框架,结合激光测月数据的约束与修正,实现月球轨道运动、自转天平动、月球重力场系数等参数的高精度解算与预报。动力学建模以天体力学基本原理为基础,构建包含地月系统引力相互作用、太阳系天体摄动、月球核幔耦合效应的动力学方程,纳入固体潮变形、潮汐耗散、相对论效应(引力时间膨胀、Shapiro时延、光行差)等多物理过程的定量修正,同时基于月球核幔结构、转动惯量等物理参数,建立自转天平动的受迫与自由章动模型。数值求解则通过辛算法、多步积分法等高精度数值积分手段,对动力学方程进行长时间尺度的积分运算,确定月球在天球参考系中的轨道根数与自转参数初值,形成初步的理论历表。在理论历表基础上,利用多源实测数据开展最小二乘批处理,实现历表参数的精准解算,最终完成标准化历表的编制与发布。

尽管月球历表研究已取得显著进展,但受物理机制认知、观测数据等多方面因素制约,仍存在诸多核心瓶颈,难以满足未来深空探测的超高精度需求。一方面,月球内部结构与动力学机制建模存在明显短板,月核热演化、核幔相互作用的物理规律尚未完全明确,缺乏精细的月球固体潮改正,相对论效应的量化修正仍有优化空间,导致长期轨道与天平动预报误差持续累积;另一方面,观测数据存在时空覆盖短板,地面LLR测站主要分布于地球的北半球,月面激光反射器集中在月球赤道附近,月球南北极数据稀缺,且国际多源观测数据的格式、参考系、误差模型不统一,跨平台融合效率低、精度损失大。此外,历表体系呈现碎片化特征,国际上尚无统一的参考系、时间尺度与动力学模型标准,月球标准时间定义与历法体系也缺乏全球通用准则。

4　月球空间基准发展思考

月球空间基准是支撑月球科学研究、工程探测与长期利用的基础性时空框架,其建设应遵循“由依附到自主、由分散到统一、由科学驱动到工程牵引”的总体发展路线。面向未来载人登月、月球长期驻留及国际协作背景,月球空间基准的发展需在月球参考框架、月球控制网、月球高程基准和重力场模型、月球历表等方面统筹推进、分阶段实施。

在空间参考框架方面,发展重点在于实现统一、稳定且可维护的月球参考系。历史上形成的ME与PA在不同应用场景中长期并存。随着高精度激光测距、重力场和地形数据的积累,月球参考框架正由经验几何定义向动力学与物理约束相结合的方向演进。未来的发展路线应包括:完善月球自转与物理天平动模型;建立ME与PA等参考系之间的高精度、可逆转换关系;形成明确的参考系版本管理与发布机制,以保障长期任务和历史数据的一致性与可比性。

目前月球高程系统主要基于参考球面定义,高精度激光测高任务(如LOLA)已显著提升了月球形状模型精度。但受制于控制点数量不足和分布不均,高程系统的绝对一致性仍有限。未来应在典

型区域(极区、月背、着陆区)逐步布设新一代月面激光反射器和无线电应答机,构建覆盖全球的绝对控制点网络;同时融合激光测高、摄影测量和导航观测数据,建立高密度、高一致性的月球控制网,实现分米至厘米级的月面定位与高程统一。

GRAIL任务使月球重力场建模精度达到新的高度,为月球大地水准面构建和内部结构研究提供了关键支撑。未来需结合后续绕月与低轨飞行任务,不断提高重力场模型的阶次与稳定性,并探索月面重力测量与局部反演方法,以支撑高精度轨道设计、着陆动力学分析和资源勘查等应用。月球历表作为空间参考框架的基准,其发展应强调自主性、一致性与长期可预报性。目前国际主流月球历表(如DE系列、INPOP系列、EPM系列)发展较为成熟,但中国独立自主的月球历表研制尚处于起步阶段,对外依赖程度较高。未来发展路线应在持续利用月球激光测距和环月探测器的轨道跟踪数据等的基础上,构建自主可控的月球轨道与自转历表体系,并实现与月球参考框架的深度耦合,形成统一的月球空间基准产品,为月球探测活动提供长期的可靠支撑。

结合中国月球探测任务规划的实际工程需求,图1给出了月球空间基准发展路线图。该图系统阐述了中国新一代月球空间基准体系从现状到目标的三阶段演进路线:以当前几何基准为主、控制点分布不均、严重依赖地面测控的现状为起点,近期(阶段1)并行推进硬件部署,并开展相关理论研究,通过布设新的月面控制点、搭建初期环月导航节点、定义广义相对论时间系统、规划月球参考框架体系,完成基础设施与理论模型的构建;中期(阶段2)聚焦系统集成与数据处理,通过多源数据联合平差、构建月球高程基准与全月控制网、完善环月通导遥星座,通过多源数据融合实现月球空间基准;远期(阶段3)开展运行维护与规范制定,通过实现基准天基自主维持、建立国际互操作标准,最终建成实时动态、高精度、全球覆盖、物理含义完备、自主可控的新一代月球空间基准体系,为中国月球探测与地月空间开发提供支撑。

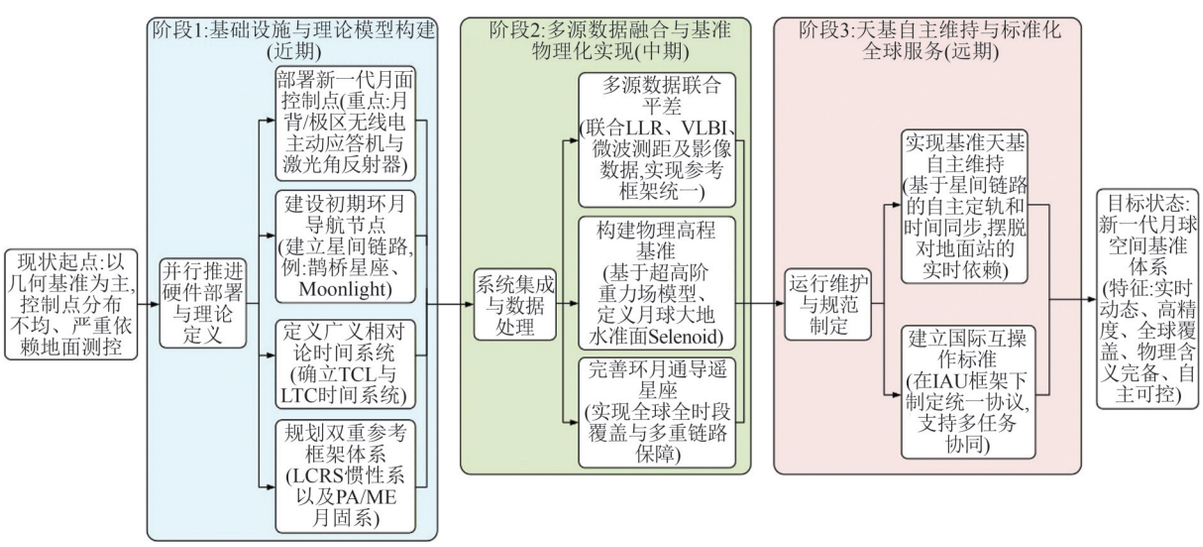


图1 新一代月球空间基准发展路线图

Fig. 1 Roadmap for the New-Generation Lunar Spatial Reference Framework

5 总结与展望

月球空间基准是支撑月球科学研究与探测工程实施的基础性参考体系,随着未来月球探测任务逐渐增多,构建中国独立自主的月球空间基准已成为关键基础需求。本文系统梳理了月球空间基准的发展历程,从早期基于地基光学观测的几何参考框架到以月球激光测距和轨道动力学为核心的动力学基准体系,再到以高精度重力场、激光测高和全球控制网为支撑的现代月球空间基准体系,全面总结了月球空间基准在坐标参考、重力与高程基准以及时间系统等方面的主要进展。为抢占月球空间基准建设战略先机,必须从强化基础设施和理论研究方面入手构建一体化支撑体系,形成全链条、可扩展的自主保障能力。补全基础设施方面,通过构建地月一体化基准网络,聚焦月球空间基准硬件部署、数据融合平台建设、关键载荷研发等方向,打造覆盖全月

域的基础设施体系。建设月面空间基准基础设施,在月球南极、艾特肯盆地等关键区域部署激光反射器阵列、增加高性能地面激光测月台站;升级地月空间基准链路,依托北斗星间链路与地月激光测距技术,打通地球、地月转移轨道、近月空间的时空基准溯源通道,解决跨区域时空基准不统一问题;搭建月球基准数据融合平台,整合嫦娥系列探测数据、月球重力场模型与地形数据,构建全月域基准库,支撑导航定位、资源勘察与工程建设需求。充分利用未来月面导航系统建设相关成果,不断精化月球空间基准精度。

在理论深化研究方面,围绕月球参考框架精化、重力场反演、月球历表解算三大关键难题,开展前瞻性理论攻关。一是完善月球空间参考框架理论,深入研究月球平轴与主轴坐标系的差异机理,优化天平动参数解算模型,提升参考框架的稳定性与精度,解决不同坐标系间米级偏差问题;二是攻克月球重力场反演理论,结合国内外探测数据,研发高阶次重力场模型解算技术,突破现有卫星重力测量精度限制,实现重力场空间分辨率提升至千米级以内,为高程基准转换提供核心支撑;三是构建利用自主数据,提升月球历表解算精度,为建立统一、自洽的月球空间参考基准提供根本依据,进而支撑月球测绘、月球地形与大地水准面模型的精化。总体而言,月球空间基准的发展是一项长期、系统性的基础工程,其路线设计必须服务于未来月球科学研究与工程活动的共同需求,并通过国际协作与技术自主并行推进,最终形成稳定、统一、可持续演进的中国独立自主的月球空间基准体系。

参　考　文　献

[1] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 351-358.
OUYANG Ziyuan. Scientific Objectives of Chinese Lunar Exploration Project and Development Strategy [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(3): 351-358.

[2] 鄢建国, 李斐, 平劲松, 等. 月球重力场模型发展现状及展望[J]. 测绘信息与工程, 2010, 35(1): 44-46.
YAN Jianguo, LI Fei, PING Jingsong, et al. The Development Situation and Prospect of Lunar Gravity Field Model[J]. *Journal of Geomatics*, 2010, 35(1): 44-46.

[3] WANG C, JIA Y Z, XUE C B, et al. Scientific Objectives and Payload Configuration of the Chang'E-7 Mission [J]. *National Science Review*, 2024, 11(2): nwad329.

[4] MAZARICO E, ROWLANDS D D, NEUMANN G A, et al. Orbit Determination of the Lunar Reconnaissance Orbiter[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(3): 193-207.

[5] ZUBER M T, SMITH D E, LEHMAN D H, et al. Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL): Mapping the Lunar Interior from Crust to Core[J]. *Space Science Reviews*, 2013, 178(1): 3-24.

[6] FOING B H, RACCA G, MARINI A, et al. SMART-1 Technology, Scientific Results and Heritage for Future Space Missions[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, 151: 141-148.

[7] MATSUMOTO K, GOOSSENS S, ISHIHARA Y, et al. An Improved Lunar Gravity Field Model from SELENE and Historical Tracking Data: Revealing the Farside Gravity Features[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2010, 115(E6): 2009JE003499.

[8] SAKAI S, KUSHIKI K, SAWAI S, et al. Moon Landing Results of SLIM: A Smart Lander for Investigating the Moon[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 235: 47-54.

[9] KANU N J, GUPTA E, VERMA G C. An Insight into India's Moon Mission—Chandrayan-3: The First Nation to Land on the Southernmost Polar Region of the Moon[J]. *Planetary and Space Science*, 2024, 242: 105864.

[10] 吴伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报, 2014, 1(1): 5-17.
WU Weiren, YU Dengyun. Development of Deep Space Exploration and Its Future Key Technologies [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(1): 5-17.

[11] LI C L, WANG C, WEI Y, et al. China's Present and Future Lunar Exploration Program[J]. *Science*, 2019, 365(6450): 238-239.

[12] LIN Y T, YANG W, ZHANG H, et al. Return to the Moon: New Perspectives on Lunar Exploration [J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(13): 2136-2148.

[13] YAN J G, XU L Y, LI F, et al. Lunar Core Structure Investigation: Implication of GRAIL Gravity Field Model [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(6): 1721-1727.

[14] ZHAO W J, WANG C. China's Lunar and Deep Space Exploration: Touching the Moon and Exploring the Universe[J]. *National Science Review*, 2019, 6(6): 1274-1278.

[15] 余后满, 饶炜, 张益源, 等. "嫦娥七号"探测器任务综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(6): 567-576.
YU Houman, RAO Wei, ZHANG Yiyuan, et al. Mission Analysis and Spacecraft Design of Chang'E-7

[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, 10(6): 567-576.

[16] NIU R, ZHANG G, MU L L, et al. Scientific Objectives and Suggestions on Landing Site Selection of Manned Lunar Exploration Engineering[J]. *Advances in Astronautics Science and Technology*, 2024, 7(1): 37-50.

[17] ISRAEL D J, MAULDIN K D, ROBERTS C J, et al. LunaNet: A Flexible and Extensible Lunar Exploration Communications and Navigation Infrastructure[C]// IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, 2020.

[18] GIORDANO P, MALMAN F, SWINDEN R, et al. The Lunar Pathfinder PNT Experiment and Moonlight Navigation Service: The Future of Lunar Position, Navigation and Timing[C]// International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Long Beach, California, USA, 2022.

[19] MA L, XIE P, LIU D P, et al. Research on the Influence of China's Commercial Spaceflight on the Economic and Social Development of the Regions Along the Belt and Road[J]. *New Space*, 2019, 7(4): 223-234.

[20] ARCHINAL B A, ACTON C H, A'HEARN M F, et al. Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2015[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2018, 130(3): 22.

[21] FOLKNER W M, WILLIAMS J G, BOGGS D H, et al. The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431[R/OL]. Interplanetary Network Progress Report 42-196, 2014-02-15. https://docslib.org/doc/6522739/the-planetary-and-lunar-ephemerides-de430-and-de431.

[22] KONOPLIV A S, PARK R S, YUAN D N, et al. High-Resolution Lunar Gravity Fields from the GRAIL Primary and Extended Missions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(5): 1452-1458.

[23] WILLIAMS J G, TURYSHEV S G, BOGGS D H, et al. Lunar Laser Ranging Science: Gravitational Physics and Lunar Interior and Geodesy[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(1): 67-71.

[24] DAVIES M E, COLVIN T R. Lunar Coordinates in the Regions of the Apollo Landers[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E8): 20277-20280.

[25] DICKEY J O, BENDER P L, FALLER J E, et al. Lunar Laser Ranging: A Continuing Legacy of the Apollo Program[J]. *Science*, 1994, 265(5171): 482-490.

[26] WILLIAMS J G, BOGGS D H, CURRIE D G. Next-Generation Laser Ranging at Lunar Geophysical Network and Commercial Lander Payload Service Sites[J]. *The Planetary Science Journal*, 2022, 3(6): 136.

[27] MÜLLER J, MURPHY T W, SCHREIBER U, et al. Lunar Laser Ranging: A Tool for General Relativity, Lunar Geophysics and Earth Science[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2195-2210.

[28] FIENGA A, VISWANATHAN V, DERAM P, et al. INPOP New Release: INPOP19a[C]// The Journées 2019 "Astrometry, Earth Rotation, and Reference Systems in the GAIA Era", Observatoire de Paris, Paris, France, 2019.

[29] PITJEVA E V, PITJEV N P. Development of Planetary Ephemerides EPM and Their Applications[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2014, 119(3): 237-256.

[30] DAVIES M E, COLVIN T R, MEYER D L. A Unified Lunar Control Network: The near Side[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1987, 92(B13): 14177-14184.

[31] DAVIES M E, COLVIN T R, MEYER D L, et al. The Unified Lunar Control Network: 1994 Version[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1994, 99(E11): 23211-23214.

[32] PAVLOV D A, WILLIAMS J G, SUVORKIN V V. Determining Parameters of Moon's Orbital and Rotational Motion from LLR Observations Using GRAIL and IERS-Recommended Models[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2016, 126(1): 61-88.

[33] MAZARICO E, BARKER M K, NEUMANN G A, et al. Detection of the Lunar Body Tide by the Lunar Orbiter Laser Altimeter[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(7): 2282-2288.

[34] ARCHINAL B A, ROSIEK M R, KIRK R L, et al. The Unified Lunar Control Network 2005(Report No. 2006-1367), Open-File Report[R/OL]. 2006-12-20. http://pubs.usgs.gov/of/2006/1367/.

[35] NAMIKI N, IWATA T, MATSUMOTO K, et al. Farside Gravity Field of the Moon from Four-Way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya)[J]. *Science*, 2009, 323(5916): 900-905.

[36] FOLKNER W M, WILLIAMS J G, BOGGS D H. The Planetary and Lunar Ephemeris DE 421[R]. Interplanetary Network Progress Report 42-178, 2009.

[37] LI C L, REN X, LIU J J, et al. Laser Altimetry Data of Chang'E-1 and the Global Lunar DEM Model[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(11): 1582-1593.

[38] WU B, HU H, GUO J. Integration of Chang'E-2 Imagery and LRO Laser Altimeter Data with a Combined Block Adjustment for Precision Lunar Topographic Modeling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 391: 1-15.

[39] 鄢建国, 李斐, 平劲松, 等. 基于"嫦娥一号"跟踪

数据的月球重力场模型CEGM-01[J]. 地球物理学报, 2010, 53(12): 2843-2851.
YAN Jianguo, LI Fei, PING Jingsong, et al. Lunar Gravity Field Model CEGM-01 Based on Tracking Data of Chang'E-1[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(12): 2843-2851.

[40] YAN J G, GOOSSENS S, MATSUMOTO K, et al. CEGM02: An Improved Lunar Gravity Model Using Chang'E-1 Orbital Tracking Data[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 62(1): 1-9.

[41] YAN J G, LIU S H, XIAO C, et al. A Degree-100 Lunar Gravity Model from the Chang'E 5T1 Mission [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 636: A45.

[42] 刘斌, 邸凯昌, 王保丰, 等. 基于LRO NAC影像的嫦娥三号着陆点高精度定位与精度验证[J]. 科学通报, 2015, 60(S2): 2750-2757.
LIU Bin, DI Kaichang, WANG Baofeng, et al. Positioning and Precision Validation of Chang'E-3 Lander Based on Multiple LRO NAC Images[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(S2): 2750-2757.

[43] 王镓, 吴伟仁, 李剑, 等. 基于视觉的嫦娥四号探测器着陆点定位[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(1): 41-53.
WANG Jia, WU Weiren, LI Jian, et al. Vision Based Chang'E-4 Landing Point Localization[J]. *Scientia Sinica* (*Technologica*), 2020, 50(1): 41-53.

[44] 郭丽, 李金岭, 王广利, 等. 嫦娥五号探测器月面定位与精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 2033-2039.
GUO Li, LI Jinling, WANG Guangli, et al. Lunar Positioning of CE-5 Detectors and Precision Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(12): 2033-2039.

[45] 刘召芹, 彭嫚, 邸凯昌, 等. 嫦娥六号着陆点高精度视觉定位[J]. 遥感学报, 2024, 28(6): 1648-1655.
LIU Zhaoqin, PENG Man, DI Kaichang, et al. High-Precision Visual Localization of the Chang'E-6 Lander [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(6): 1648-1655.

[46] DI K, LIU B, LIU Z, et al. LGCN2025: A New Lunar Global Control Network Constructed from High-Resolution Orbital Data[C]// Lunar and Planetary Institute. Lunar and Planetary Science LVI, Woodlands, Texas, USA, 2025.

[47] IAU. Resolution to Establish a Standard Lunar Celestial Reference System (LCRS) and Lunar [C]// The 32nd General Assembly, Cape Town, Republic of South Africa, 2024.

[48] WANG Y X, MAIELLO M. The First Laser Retroreflector on the Lunar far Side Onboard China's Chang'E-6 Lander[J]. *Space: Science & Technology*, 2025, 5: 301.

[49] 李建成, 许刚, 胡俊, 等. 月球三维基准确定及其重力场研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(11): 4499-4511.
LI Jiancheng, XU Gang, HU Jun, et al. Advances in Lunar Three-Dimensional Reference Frame Determination and Gravity Field Research[J]. *Journal of Central South University* (*Science and Technology*), 2025, 56(11): 4499-4511.

[50] ARAKI H, TAZAWA S, NODA H, et al. Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry[J]. *Science*, 2009, 323(5916): 897-900.

[51] BARKER M K, MAZARICO E, NEUMANN G A, et al. A New Lunar Digital Elevation Model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera[J]. *Icarus*, 2016, 273: 346-355.

[52] SMITH D E, ZUBER M T, NEUMANN G A, et al. Summary of the Results from the Lunar Orbiter Laser Altimeter After Seven Years in Lunar Orbit [J]. *Icarus*, 2017, 283: 70-91.

[53] 李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 基于嫦娥二号立体影像的全月高精度地形重建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(4): 485-495.
LI Chunlai, LIU Jianjun, REN Xin, et al. Lunar Global High-Precision Terrain Reconstruction Based on Chang'E-2 Stereo Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(4): 485-495.

[54] PARK R S, BERNE A, KONOPLIV A S, et al. Thermal Asymmetry in the Moon's Mantle Inferred from Monthly Tidal Response[J]. *Nature*, 2025, 641(8065): 1188-1192.

[55] PARK R S, FOLKNER W M, WILLIAMS J G, et al. The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, 161(3): 105.

[56] 杨婉羚, 高梧桐, 粟文捷, 等. 面向高精度历表的月球轨道与天平动建模及LLR数据应用[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(3): 294-304.
YANG Wanling, GAO Wutong, SU Wenjie, et al. Lunar Orbit, Libration Modeling and LLR Data Application for High-Precision Ephemeris[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2025, 12(3): 294-304.

[57] TIAN W. PETREL19: A New Numerical Solution of Planetary and Lunar Ephemeris[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2023, 135(4): 38.

[58] LU X, YANG T N, XIE Y. Lunar Time Ephemeris LTE440: Definitions, Algorithm, and Performance [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2025, 704: A76.