

秘金钟,王春杨,白振栋,等.全域数字空间基准现状与发展趋势研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(2):164-176.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250394  
BEI Jinzhong, WANG Chunyang, BAI Zhendong, et al. Research on the current situation and development trends of the global digital space reference system[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(2): 164-176. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250394

# 全域数字空间基准现状与发展趋势研究

秘金钟<sup>1,2</sup>, 王春杨<sup>1,3</sup>, 白振栋<sup>4\*</sup>, 杨熙<sup>5</sup>, 刘焕玲<sup>1,2</sup>

(1. 中国测绘科学研究院, 北京 100036; 2. 北京房山人卫激光国家野外科学观测研究站, 北京 100036;  
3. 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000; 4. 自然资源部地理信息管理局, 北京 100034;  
5. 自然资源部第二大地测量队, 黑龙江 哈尔滨 150006)

**摘 要:** 全域数字空间基准作为建设数字中国的基石, 是实现各类空间数据统一表达、融合与交互的核心, 涵盖了大地基准、高程基准、深度基准、重力基准、其他空间基准等多个方面。当前中国在空间基准方面取得了显著进展, 构建了覆盖陆海空天的高精度、动态化、智能化基准体系。然而随着数字孪生、元宇宙、人工智能等新兴技术的快速发展, 全域数字空间基准在精度、动态性、智能化等方面仍面临诸多挑战。本文从多维度融合与创新、高精度、动态化、智能化等方面详细阐述全域数字空间基准的发展趋势, 从大地基准、高程基准、重力基准、深度基准、空间基准服务系统及其他空间基准六个方面提出未来发展任务。空间基准的持续推进将为中国自然资源管理、空间规划、工程建设以及科学研究等提供坚实的空间基准保障, 推动中国在数字经济、智慧城市、海洋开发等领域的高质量发展, 为实现国家治理体系和治理能力现代化提供重要的技术支撑。

**关键词:** 全域数字空间基准; 大地基准; 高程基准; 重力基准; 深度基准

中图分类号: P205

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)02-0164-13

## Research on the current situation and development trends of the global digital space reference system

BEI Jinzhong<sup>1,2</sup>, WANG Chunyang<sup>1,3</sup>, BAI Zhendong<sup>4\*</sup>, YANG Xi<sup>5</sup>, LIU Huanling<sup>1,2</sup>

(1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China; 2. Beijing Fangshan Satellite Laser Ranging National Observation and Research Station, Beijing 100036, China; 3. School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 4. Ministry of Natural Resources, Department of Geographic Information Management, Beijing 100034, China; 5. The Second Geodetic Surveying Brigade of Ministry of Natural Resources, Harbin 150006, China)

**Abstract:** The all-domain digital space reference system, as a key cornerstone for the construction of Digital China, is the core for the unified expression, integration and interaction of various spatial data, covering multiple aspects such as geodetic reference, height reference, depth reference, gravity reference and other spatial references. Currently, China has made significant progress in spatial reference systems, establishing a high-precision, dynamic and intelligent reference system covering land, sea, air and space. However, with the rapid development of emerging technologies such as digital twins and the metaverse, the all-domain digital space reference system still faces many challenges in terms of accuracy, dynamics and intelligence. This paper elaborates on the development trends of the all-domain digital space reference system from multiple dimensions of integration and innovation, high precision, dynamics and intelligence, and proposes future development tasks from six aspects: geodetic reference, height reference, gravity reference, depth reference, surveying and mapping reference service system and other spatial references. The continuous advancement of the spatial benchmark will

收稿日期: 2025-09-15 修回日期: 2026-01-04 接受日期: 2026-01-21 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家重点研发课题(2021YFB3900803); 科技部野外台站专项课题(2026)

作者简介: 秘金钟(1975-), 男, 河北衡水人, 博士, 研究员, 主要从事全域数字空间基准和智能PNT方面的研究。

E-mail: goldheal@casm.ac.cn

通信作者: 白振栋(1982-), 男, 山东临沂人, 硕士, 工程师, 主要从事空间基准方面的研究。E-mail: baimengyun@163.com

provide solid surveying and mapping reference guarantees for the country's natural resource management, spatial planning, engineering construction and scientific research, promote high-quality development in fields such as the digital economy, smart cities and marine development, and provide important technical support for the modernization of the national governance system and governance capacity.

**Keywords:** global digital space reference system; geodetic reference system; elevation reference system; gravity reference system; depth reference system

## 0 引言

随着数字信息技术的飞速发展以及空间技术的广泛应用,人们对空间数据的精确性、一致性以及标准性提出了更高要求,全域数字空间基准应运而生。全域数字空间基准是涉及陆海空、室内外、虚拟及现实空间覆盖物理世界与数字孪生空间的标准化参照体系<sup>[1]</sup>,也是实现各类数据统一表达、融合与交互的关键<sup>[2]</sup>。全域数字空间基准可用于整合多源空间数据,实现时空信息的标准化与共享,为各类空间活动提供统一的定位、导航及授时基准,是建设数字中国的空间基础设施的核心<sup>[3]</sup>。

全域数字空间基准是一个复杂的体系,涵盖多个组成部分,以确保为各类空间活动提供统一、精确的定位以及导航授时等基础参考<sup>[4]</sup>。它包括大地基准,用于确定空间点位的坐标信息;高程基准,用于确定空间点位的高程信息;深度基准,用于海洋领域确定水深信息;重力基准,用于确定空间点位的重力信息<sup>[5]</sup>;其他空间基准,例如室内地下基准、海洋立体基准、月球基准及深空基准。其中,室内地下基准用于确定地下与室内空间的统一定位导航信息;海洋立体基准用于确定覆盖水面、水体、水下的三维海洋空间定位信息;月球基准用于确定月球探测工程中的定位、导航与制图信息;深空基准用于确定深空探测任务的高精度时空参考信息。数字空间基准是空间基准的模型化,是在实体空间的基础上形成的数字产品。虚拟空间基准是在虚拟环境中建立的用于定位、导航和测量的参考框架。利用实体基准基础设施与虚拟数字基准模型构建数字基准产品,借助卫星导航定位、重力测量、光钟等先进技术装备、数据模型及信息平台,可形成一个完整、精准、动态的基准体系,实现空间基准的统一集成、管理服务与精度保障,为现代空间技术的应用提供技术支撑。

当前,全球数字化发展日益加快,时空信息、定位导航服务成为重要的新型基础设施。随着物联网、5G、大数据、云计算、区块链及人工智能

等数字化技术的进步,建立全域数字空间基准已成为推动测绘地理信息向数字化转型、智能化发展的基础性工作<sup>[6]</sup>,是国家治理体系和治理能力现代化的重要技术保障。2024年11月,国家数据局发布的《可信数据空间发展行动计划(2024—2028年)》中明确提出,要构建城市可信数据空间,推动数据要素安全可信流通。全域数字空间基准作为城市数字孪生的时空底座,可为数据空间提供空间唯一标识,实现时间同步,支撑跨部门、跨行业的数据确权、流通及监管链协同,为数据要素市场化改革提供技术保障。

## 1 全域数字空间基准发展现状

全域数字空间基准是中国数字化转型时空底座的标准尺度,其核心是将物理世界与虚拟世界精准映射至同一套高精度、动态更新的时空坐标体系中。从内容维度来看,它涵盖大地、高程、深度、重力等多个领域;从空间维度来看,它覆盖从室内、地下、水下等封闭空间到地表、低空、大气层、地月空间乃至日地空间的全空间范围。从虚实空间层面划分,它是实体空间与虚拟空间的深度融合。全域数字空间基准组成见图1。

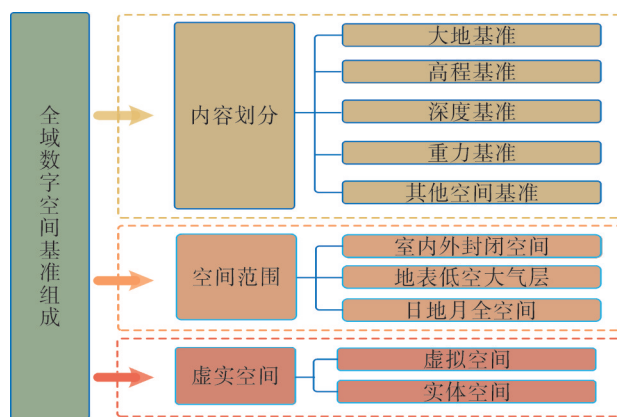


图1 全域数字空间基准组成

Fig.1 composition of the global digital space reference system

目前,中国已在大地、高程、深度、重力这几大基准方面构建了“点-线-面-体”多维度、厘米级乃至纳秒级的立体化框架体系。例如,中国以2000国家大地坐标系(China geodetic coordinate

system 2000, CGCS2000) 为核心, 构建了厘米级精度的陆海空天一体化空间基准框架, 并在近海建成了厘米级精度的海底大地试验网, 实现了从陆地到海洋的拓展。北斗/GNSS 连续运行站网、“5G+物联网”、无人机倾斜摄影及激光雷达等多源观测技术的加速融合, 形成了“空-天-地-网”一体化感知与毫米级获取能力。尽管中国在多个领域已取得显著成效, 但随着数字孪生、元宇宙等新兴技术对“全域、全时、全要素”精度需求的指数级增长, 现有体系的诸多不足也逐渐显现。

### 1.1 大地基准

大地基准是建立国家大地坐标系统、推算国家大地控制网中各点位大地坐标的基本依据, 也是国土测绘和地理空间研究的重要基础框架。

现代大地基准的建设依赖全球协作, 通过国际组织协调各国力量, 系统收集与处理全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)等空间大地测量数据, 共同构建全球统一的坐标参考框架, 发布包括站点坐标、速度场和地球定向参数在内的高精度框架产品, 为全球地球科学研究与空间应用提供基准支撑。

目前, 国际地球参考框架(international terrestrial reference frame, ITRF)是全球精度最高的地心坐标框架, 为各国大地基准的建立提供了重要参考。自1988年第一个国际地球参考框架(ITRF88版本)发布以来, 国际地球自转与参考系统服务组织(international earth rotation and reference systems service, IERS)已经发布了多个版本的ITRF, 其中, ITRF2020是目前的最新版本。它的建立与维持充分考虑了地球的非线性运动, 整合了全球VLBI、SLR、GNSS和DORIS四种空间大地测量技术的数据, 经过严格的解算和联合处理, 在零点、尺度、定向以及定向随时间的演变这四个基准要素的确定上精度更高<sup>[7]</sup>, 实现了高精度全球坐标参考框架的构建。在国际大地基准建设过程中, 各国的基准站网发挥了重要作用<sup>[8]</sup>。例如, 欧洲定轨中心提供了高精度的卫星轨道和钟差产品, 为ITRF的建立提供了关键数据支持; 国际GNSS服务组织在全球范围内建立了多个基准站, 其数据被用于ITRF解算, 保证了框架的稳定性和精度<sup>[9]</sup>。此外, 国际上还建立了多个区域性的参考框架, 例如欧洲参考框架、亚太地区参考框架等, 这些区域参考框架不仅为区域内的大地测量提供了高

精度参考, 还与ITRF实现了良好衔接。

中国大地基准建设历经多年发展, 已构建了一套较为完善的高精度、动态化、智能化的陆海空一体化基准体系<sup>[10-12]</sup>。目前, 中国已建成400余座国家级GNSS基准站和3000余座省级GNSS基准站, 国家GNSS大地控制网涵盖6000余点, 形成了遍布全国的高密度GNSS控制网。在VLBI方面, 中国建成了北京房山站、上海佘山站等国内10余座、海外5座VLBI站, 打造了南天VLBI锚点, 跨洲际基线延伸至9000 km<sup>[13]</sup>。在SLR技术方面, 实现了2000 Hz全天时激光测距, 精度优于5 mm, 关键器件完全国产化, 为毫米级地心框架维护提供了支撑。在海洋大地测量方面, 2020年, 中国在南海3000 m深海建立了首个海底基准与导航定位试验网, 实现了中国海底基准站技术装备“0”到“1”的突破<sup>[14]</sup>。2021年, 中国又研发了海底短基线多波束换能器海底基准站, 并在南海进行深海试验验证<sup>[15]</sup>。2023年, 中国开展多频多模声呐海底基准站信标研制, 并在南海开展了长距离导航定位试验。

新中国成立以来, 中国已先后建成了三代坐标系统, 即1954年北京坐标系、1980年西安坐标系、2000国家大地坐标系及其2000坐标框架。中国2000国家大地坐标系的构建过程与ITRF参考框架密切相关。CGCS 2000是在ITRF的基础上, 通过加密观测与数据处理等手段实现的, 这确保了我国大地坐标系与国际标准的接轨, 为国内测绘、导航以及相关科学研究奠定了坚实基础。国际数据的引入以及国际坐标参考框架建立过程中所提出的先进技术和理念, 均对中国构建与国际标准相一致且精度更高的国家大地控制网起到重要作用。

目前, 中国在大地基准建设方面仍面临诸多挑战。首先, ITRF基准站主要集中在欧美等发达国家, 而在发展中国家和海洋区域的分布较少, 全球分布不均导致全球大地测量的精度和可靠性受到影响, 使中国大地基准在与国际地球参考框架进行高精度无缝衔接以及协同应用时面临更大困难。其次, 地球自转受多种复杂因素影响, 例如大气环流、海洋潮汐、地核运动等, 难以精确预测地球定向参数(earth orientation parameters, EOP)变化<sup>[16]</sup>。再次, 基准站的运动受多种非线性因素影响, 例如地壳运动、大气压力变化、地下水位变化等, 难以用数学模型精确描述, 导致基准站运动建模更为复杂。最后, 在地心坐标的精准确定方面, GNSS、VLBI、SLR等先进测量技术

仍存在系统误差,且在高精度测量中难以完全消除,给地心坐标的精准确定带来一定影响<sup>[17]</sup>。

## 1.2 高程基准

高程基准是重要的空间基础设施,是中国现代化建设和社会发展不可或缺的基础支撑,在多个领域发挥重要作用。建设国际高程基准是全球大地测量科学的核心目标。近年来,在理论基础与定义的完善、国际高程参考框架(international height reference frame, IHRF)的建立方法以及全球高程基准的统一等方面已取得显著进展。国际大地测量协会(international association of geodesy, IAG)明确了国际高程参考系统(international height reference system, IHRS)的定义<sup>[18]</sup>,提出了建立国际高程参考框架的目标,通过全球50余个核心站与各国加密站的协同布局,推动全球参考站重力位值向 $\pm 1$  cm精度迈进;在技术层面,高阶地球重力场模型与区域重力场建模技术已实现对大部分区域高程基准的精确计算。光学原子钟与相对论大地测量技术的融合为高程基准的长期稳定性提供了保障,也为统一全球高程基准提供了新技术,目前已在欧洲大地测量网络等场景进行试点应用。

中国高程起算面以青岛的黄海平均海平面为基准。自新中国成立以来,已开展了3次一等水准观测工作,先后建设了1956年黄海高程基准和1985年国家高程基准。其中,1956年黄海高程基准为中国首个国家高程基准,是利用青岛验潮站1950—1956年潮汐观测资料计算得出的黄海平均海平面作为高程基准面。由于计算时所依据的观测时间较短,未能涵盖潮汐变化的一个完整周期,且观测数据中存在粗差,因此中国测绘主管部门决定重新计算黄海平均海面。1985年国家高程基准是基于青岛验潮站1952—1979年的潮汐观测资料计算得出的,其水准原点的高程为72.260 m<sup>[19]</sup>。该基准自1988年1月1日启用,取代了1956年黄海高程基准。随着空间大地测量技术的迅猛发展,建立全球统一的高程基准已成为当务之急<sup>[20-21]</sup>。包括中国在内的国际大地测量学界正全力聚焦于全球和区域高分辨率、高精度(似)大地水准面的精化工作。中国地方测绘部门建立的中国2000似大地水准面CQG2000及军事测绘部门建立的2000中国重力场与大地水准面数字模型,精度可达分米级,后者在部分区域甚至达到厘米级精度。目前,部分城市建立的局部似大地水准面模型精度也已达厘米级<sup>[22-23]</sup>。

高程基准的建设仍需解决许多问题。首先,

区域发展不平衡。经济发达地区和重点城市对高程基准的维护更新较好,而经济欠发达地区和偏远山区存在基准点损坏、数据更新不及时等问题,影响了高程基准的准确性和可用性。其次,陆海高程基准尚未完全统一。陆地高程基准以青岛黄海平均海平面为起算面,海洋高程基准则依赖潮汐观测和海洋重力测量,两者衔接问题会影响陆海一体化测绘的精度和效率。再次,特殊环境下高程测量技术尚未完全突破。高山、沙漠、极地、深海等自然环境较恶劣的地区,测量条件复杂,采用传统方法难以满足高精度要求。最后,高程基准动态更新机制尚不完善,缺乏有效监测和更新机制,导致更新滞后。上述问题制约了中国高程基准的进一步发展,亟需加快技术创新,以满足现代科学和工程应用对高精度高程基准的需求。

## 1.3 重力基准

重力基准是开展区域乃至国家重力控制测量工作的基石,可为国家重力测量提供统一的起算依据<sup>[24]</sup>。近年来,国际重力基准建设取得显著进展,其核心是建立国际重力参考系统(international gravity reference system, IGRS)和国际重力参考框架(international gravity reference frame, IGRF)。IGRS以自由下落的瞬时加速度为测量量并用国际单位制来表示,拥有一套用于时间依赖修正的参考量。IGRF作为IGRS的实现框架<sup>[25]</sup>,包含全球一系列站点的可靠绝对重力值,通过连续运行的超导重力仪或定期重复的绝对重力观测来确保长期稳定的绝对重力参考。全球重力网络的建设始于20世纪初,并在国际协作中逐步推进。1971年,国际大地测量学与地球物理学联合会建立了1970年国际重力标准化网,这是一个由1854个站点组成的全球重力网。目前,大部分国家都建立了自己的重力网,并试图与周边国家的重力网相连接。例如,欧洲的许多数据都被纳入2002年统一的欧洲重力网项目数据库。此外,一些国家和地区也在不断扩展和更新其重力网,例如,自2017年以来乌拉圭增加了321个新的相对点,并计划做进一步调整。阿根廷-德国大地测量观测站是南美洲和加勒比地区唯一提供连续重力参考函数的站点。

自20世纪50年代开始中国构建国家重力基准体系,相继建成了1957国家重力基本网、1985国家重力基本网及2000国家重力基本网<sup>[23]</sup>,实现了从依赖国际波茨坦基准到完全自主的绝对重力基准体系的跨越。2000国家重力基本网以259个高精度点覆盖我国大陆并扩展到港澳地区和南海海域,

精度达 $\pm 7.4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ,为珠峰高程测量、卫星重力、海洋重力等重大工程提供重要支撑。20世纪80年代,中国开始实施绝对重力观测,以国内外合作形式开展观测并建立重力基准。“中国地壳运动观测网络”工程建成实施后,每2至3年对中国大陆25个基准站进行一期绝对重力观测,初步构建了中国大陆统一的重力基准网。2012年建成的“中国大陆构造环境监测网络”涵盖101个绝对重力测点,形成了中国大陆分布基本均匀的绝对重力测网,为重力基准网、相对重力联测网提供重力基准控制。近年来建成的中国新一代重力基准网,由超导重力站、重力基准点、基本点、引点等组成。目前,中国重力基准研究已形成了覆盖陆海空天、“绝对-相对-卫星”三位一体的综合体系。其中,陆域依托国家绝对重力基准网与相对重力联测,实现了微伽级精度控制;海域通过船载、海底重力仪与卫星测高融合,填补了海洋数据的空白;空天领域借助航空重力测量与GRACE/GOCE系列卫星,形成了动态时变监测,贯通了从静态基准到1 Hz高频时变场、从单点绝对到全球模型的全链条标准<sup>[26-27]</sup>。

尽管已取得诸多成就,中国在重力基准建设方面仍存在不足。首先,现有的国产重力测量仪器在稳定性、环境适应性等方面,与国际先进的原子干涉重力仪存在差距,且低成本海底重力基准装备的缺乏,限制了重力基准的全面覆盖与精度提升。其次,基准点损毁与失稳问题严重。超六成基准点因城市建设、自然灾害及人为破坏而受损或失稳,导致现势性不足,无法及时准确地反映重力场变化情况<sup>[28]</sup>。在数据处理环节,静态平差模型难以反映地壳垂直运动及多期观测的时变特征,海量历史数据的新旧基准转换缺乏统一的技术路径,导致基准成果更新滞后,无法满足高精度、动态化的应用需求。最后,西部陆域及海域基准点分布稀疏,难以满足实景三维中国、北斗增强系统、高精度制导武器等对重力基准的需求。因此,启动新一代高精度、动态、统一的国家重力基准建设,是提升中国重力基准的整体水平与服务能力的关键。

#### 1.4 深度基准

深度基准是海洋测绘和航海安全的基础核心,为海洋活动提供了统一的参考基准面<sup>[29-30]</sup>。目前,深度基准建设正处于从局域试验向全球组网过渡的关键阶段。以国际海道测量组织(international hydrographic organization, IHO)推荐的最低天文潮面(lowest astronomical tide, LAT)为代表的基

准模型,已在全球航海图中得到广泛应用,这推动了基准的初步统一。然而,在实际构建过程中,由于各国所用的潮位数据、分潮模型及算法存在差异,相邻海域的基准面仍存在不容忽视的偏差。为应对这一挑战,国际前沿利用卫星测高、全球导航卫星系统反射测量(global navigation satellite system reflectometry, GNSS-R)、遥感反演、海底压力传感网络等先进技术,通过多源数据融合与高精度数值建模来精化全球和区域的深度基准面,构建一个无缝衔接、高精度且稳定可靠的全球统一垂直基准框架,为未来全球海洋航行、资源开发和地球科学研究奠定坚实的数据基础<sup>[31]</sup>。

中国将深度基准建设作为一项系统性工程,融合海洋学、大地测量学与信息技术等多个学科,构建了覆盖全国管辖海域的国家深度基准体系。该体系的建设应用了多种观测技术及设施,其中,岸基GNSS基准站与验潮站的并置建设,为陆地高程测量提供了高精度基准,实现了陆地高程基准与海洋深度基准的密切关联,成为构建陆海统一垂直基准的关键。新兴的GNSS-R技术,可实时反演岸边潮位,为传统验潮站难以覆盖的区域提供有效的数据补充,拓展基准监测的时空覆盖范围<sup>[32-34]</sup>。此外,GNSS浮标在开阔海域中可实时监测海面高度的动态变化情况,为沿岸深度基准向远海传递提供重要的技术支撑<sup>[35]</sup>。为了维持精化深度基准面的海底基础设施,中国积极发展海底大地基准网。该网络基于压力传感器,其核心功能之一是提供高精度的海底垂直定位基准,不仅能服务于深度基准的校验与维持,还能为海底板块运动监测、海啸预警等地球科学研究和重大安全保障任务提供支撑。目前,中国已初步实现对海底高程的毫米级到厘米级的稳定监测。

目前,深度基准面临四大核心问题。一是现有基准多为局域布设,尚未与全球统一时空基准网融合,导致远海区域基准传递困难,限制了深度基准在更广阔海域的应用和数据共享。二是不同机构在深度基准建设过程中所采用的观测数据、算法、分潮模型及订正方法缺乏统一标准,给海洋测绘和航海安全带来潜在风险。三是海底压力计长期漂移及声速误差累积问题依然存在,给深度基准的精度、长期稳定性、可靠性及跨区域拼接应用带来一定影响<sup>[36]</sup>。四是在相同海域、不同时期下多类观测模型的精化、多源海洋观测数据的融合处理等方面的问题也亟待解决。上述问题不仅影响深度基准建设的整体质量和效率,也给中国海洋测绘和航海安全带来挑战<sup>[37]</sup>。

### 1.5 其他空间基准

其他空间基准的建设与发展标志着人类空间认知与利用能力从地表向全域延伸,也反映了国家层面在关键领域的战略自主权、在未来新兴产业的竞争力,以及在星际探索时代的国际话语权。当前国际发展呈激烈竞争与协同演进并存的格局。在室内与地下基准方面,欧洲、美国、日本等凭借先进的无线传感与地磁匹配技术,在大型设施的数字化管理等领域处于领先地位。在海洋立体基准方面,美国等海洋强国已建立了相对成熟的近海至深海监测基准网络,并积极推动国际标准的制定。在月球与深空基准这一战略新高地,国际竞争尤为激烈。美国依托“阿尔忒弥斯”计划,联合多国加速构建以“月球坐标系”为核心的月球测绘基准体系,并试图将其扩展为深空导航标准。整体而言,全球主要航天国家正竞相布局,旨在通过主导未来基准体系的构建,抢占从地球内部到地外空间的数据主权。

中国其他空间基准的发展形成了从地球室内与地下空间向深海远洋乃至地外天体延伸的立体化、综合性体系<sup>[4]</sup>。在室内与地下空间方面,中国正着力研发不依赖于卫星信号的定位基准技术,旨在构建无缝衔接的统一定位导航网络,以解决封闭复杂环境中精准定位难题<sup>[38]</sup>。在海洋领域,中国积极建立覆盖水面、水体、海底的立体化海洋时空基准框架,为海洋资源开发、环境监测及权益维护提供统一的三维空间信息支撑。在月球及以远深空领域,中国已启动并推进月球坐标系等天基基准的建立工作,为“嫦娥”工程等月球探测任务提供精确的定位、制图与导航服务,前瞻性地布局能服务于更遥远行星际探测的高精度时空参考系统,向陆海统筹、天地一体、室内外融合的方向迈进。

中国虽在北斗全球系统、月球探测等领域取得了系列突破并积极参与国际合作,但在全体系融合与国际标准主导权方面仍面临挑战。一是技术体系尚显碎片化与不均衡,例如室内与地下基准高度依赖特定场景,缺乏统一标准与通用解决方案;深远海实时高精度观测设施的不足、海陆基准无缝衔接的复杂性以及水下环境面临的技术瓶颈,限制了海洋立体基准的应用。二是月球与深空基准的构建仍处于起步与追赶阶段,缺乏长期、系统性的工程部署与数据积累,自主可控的全球深空测控网仍显薄弱,相关理论与模型研究基础仍有待夯实。三是跨部门、跨领域的协调机制与数据共享壁垒依然存在,基准建设难以形成

高效的合力。具有国际影响力的自主标准的缺失、高端复合型人才储备的不足,以及从“技术突破”到“业务化运行服务”的转化链条不畅,共同制约了中国在新兴基准领域的快速成熟与全球竞争力的提升。

### 1.6 空间维度

全域数字空间基准涵盖了从物理空间到虚拟空间的完整维度,其发展面临不同挑战<sup>[39-40]</sup>。实体(物理)空间基准通过精确的几何和时空信息为各种应用提供基础支持,是在现实世界中用于定位、导航和测量的参考框架。近年来,为满足地理空间数字孪生构建的“天-空-地-海”全域感知网络数据的管理需求,现代空间基准体系实现了厘米级几何精度和统一时空框架的构建<sup>[41]</sup>。这种高精度的基准体系不仅强调实体对象在数字空间位置与形态的精确映射,更致力于保障实体间空间关系与拓扑的一致性,为智慧城市、实景三维等的应用提供可拓展性、可度量性的坐标基础<sup>[42]</sup>。例如,在智慧城市中,通过高精度的地理信息数据,实现城市基础设施的精细化管理和实时监控;在实景三维应用中,利用高精度的三维模型,为城市规划、环境监测和灾害预警等提供有力支持<sup>[43]</sup>。

虚拟空间基准通过将物理空间中的地理信息、环境数据以及其他相关数据映射到虚拟空间,是在虚拟环境中建立的用于定位、导航和测量的参考框架,可为虚拟现实、增强现实、数字孪生等技术提供统一的时空参照<sup>[44]</sup>。它不仅包括几何位置信息,还涉及时间同步、数据标准化等多个方面。近年来,虚拟空间基准技术在多个领域得到广泛应用<sup>[45]</sup>,特别是在工业制造、能源电力、交通运输和医疗健康等领域。例如,在工业制造中,通过将物理实体的运行数据映射到虚拟空间,实现工业生产过程的实时控制和优化;在智慧城市和数字孪生领域,为城市数字化管理提供高精度的时空框架<sup>[46]</sup>。虚拟空间基准技术的发展受益于虚拟空间与物理空间的深度融合。通过虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术,用户可以在虚拟空间中进行沉浸式体验,与物理空间中的物体进行交互,这种融合为虚拟空间基准技术的应用提供了更广阔的空间<sup>[47]</sup>。

尽管在实体空间和虚拟空间基准的构建与应用方面已取得显著进展,但全域数字空间基准的“全域”属性仍面临诸多挑战。全域数字空间基准需要跨越行政边界、行业壁垒和技术体系,以实现动态环境下的持续一致性。但现实中,不同部门和平台之间的空间基准尚未完全统一,数据标

准化和共享不足以及坐标系统的异构性容易形成“数据孤岛”，限制跨域空间关联分析与实时协同映射的精度与效率。此外，现有平台在整合多源空间数据时，缺乏动态更新与误差传播控制机制，导致大范围空间基准的一致性与可靠性难以保障。因此，尽管全域数字空间基准在空间维度上已具备高精度单点映射能力，但在多主体、多尺度、动态演化的全域协同环境中，仍面临基准统一、实时校准与跨域共享的深度挑战<sup>[48]</sup>。

## 2 全域数字空间基准发展趋势与任务

目前，全域数字空间基准已初步建成厘米级静态框架，深度融入北斗、5G、遥感等“空-天-地-网”多源观测体系<sup>[49]</sup>。随着技术的不断进步，全域数字空间基准正朝着高精度、动态化、智能化方向发展。特别是人工智能大模型技术，在时空数据预测与分析中展现出巨大潜力。例如，在重力场时变预测、高程异常智能修正与地质调查数据解译方面，人工智能大模型技术通过多源异构数据融合训练，可实现对基准动态变化的提前预警与自适应修正。量子计算技术的突破，为大规模大地测量网平差、重力场反演与坐标框架维持等复杂计算问题提供了指数级算力提升，有望将框架更新周期从月度缩短至实时。

中国基准体系的多网融合已成为重要趋势，即通过整合卫星导航定位系统、地理信息系统和物联网等数据获取手段，实现数据实时更新和动态监测，为城市规划、建设和治理提供更加精准的时空定位和数据支撑<sup>[50]</sup>。全域数字空间基准与城市数字化的深度融合，成为数字城市建设的重要基础。此外，多技术融合与应用创新也成为全域数字空间基准发展的重要方向。通过将建筑物信息模型、地理信息系统、物联网等技术相结合，构建高精度的时空大数据，为数字空间的构建和应用提供更强大的支持<sup>[51]</sup>。

为解决当前空间基准问题，实现未来基准一体化建设、常态化维持与智能化服务目标，从大地基准、高程基准、重力基准、深度基准、空间基准服务系统及其他空间基准六个方面展开任务思考，旨在构建一个更加精准、高效和智能化的空间基准体系，为中国自然资源管理、空间规划、工程建设以及科学研究等提供坚实的空间基准保障。

大地基准正朝着“高精度、三维、动态、地心、陆海空一体”方向升级。在陆地领域，应以CGCS 2000为基础，完成从厘米级到毫米级、从

长期框架到历元框架的升级<sup>[52]</sup>，构建基于ITRF2020的新一代地心坐标框架并保持常态化更新。在海洋领域，需在海洋表面部署GNSS浮标，利用GNSS、水声定位和压力传感器等技术，将全球统一的时空基准传递到立体海洋，实时监测海洋动态变化。在空天领域，应积极借鉴国际先进经验。例如，欧盟GENINES项目计划在2030年前部署12颗天基基准卫星，通过星间链路实现框架精度提升30%<sup>[53]</sup>；IERS已启动ITRF2030预研，重点引入深度学习模型，量化冰后回弹、地下水变化等非线性负荷效应，将站坐标预测精度提升至毫米级。中国需加快天基基准卫星论证，参与IERS下一代框架技术预研<sup>[54]</sup>，建设自主空间基准卫星，通过在轨卫星之间的信号交互及地面控制站的协同，形成稳定的天基参考框架。

中国大地基准建设的主要任务，一是统筹国际及国内基于BDS-3的GNSS基准站数据，对基准站数据进行处理，得到GNSS基准站坐标及其速度值，建立精细的板块运动模型，实现年度历元坐标框架（包括GNSS/VLBI/SLR框架、GNSS框架、北斗框架），发布框架点坐标。二是维持VLBI站运行，开展国际、国内VLBI联测及框架参数解算等数据处理。三是维持SLR站运行，开展国际、国内SLR联测及数据处理。四是每年定期开展全国GNSS大地点基于BDS的GNSS更新测量，纳入历元坐标框架。五是通过融合GNSS/SLR/VLBI多源大地测量技术，生成潮汐模型、大气延迟模型和对流层/电离层延迟模型等实时、事后框架类服务及EOP产品。

高程基准正朝着高精度、稳定性和数字化方向发展。国际高程基准正经历从静态几何到动态物理的转变。2023年，IAG发布IHRs实施路线图，明确2030年前建成全球80个核心站，通过“绝对重力+超导重力”仪实现重力位长期稳定监测。德国PTB的Optical Clock Networks项目已验证了利用光频差进行洲际高程传递的可行性，其精度较传统水准提高一个数量级<sup>[55]</sup>。欧空局NGGM双星编队计划将重力场模型阶次提升至300，直接支持全球厘米级高程基准统一。中国未来主要通过构建分层架构来实现高程基准的现代化建设。其中，第一层的光钟控制网借助高精度光钟技术实现连续观测及长距离的高程传递，以保障高程数据的精确性和稳定性；第二层的一等水准网将沉降区深层基岩标和非沉降区的深层水准标作为基本控制，沉降区的深层基岩标能有效抵御地面沉降带来的影响，非沉降区基岩标则作

为连接点,保障一等水准网的均匀分布与高精度连接;第三层的二等水准网及其他水准基础设施进一步细化了高程基准的覆盖范围,实现全国范围内高程基准全覆盖。

建设高程基准的主要任务,一是积极参与国际大地测量协会主导的国际高程参考框架(international height reference frame, IHRF)计划,在中国境内布设8~10个IHRF核心站,开展绝对重力、潮汐、温压湿等多种观测,形成与全球高程基准“0.5 cm级”无缝衔接的转换模型,提升中国在国际空间基准领域的话语权<sup>[56]</sup>。二是构建光钟高程控制网,开展国内外光钟联测与国际比对,建立基于光学频率标准的高程计量基准,实现跨区域、跨技术体系的厘米级高程传递与统一。三是在国内重点沉降区建设一等水准网,并与现有一等水准网衔接,将所有GNSS基准站、GNSS大地点优先选作一等水准节点,构建“厘米级平面、毫米级高程”一体化控制骨架,形成覆盖大陆与近海的统一垂直基准<sup>[57]</sup>。充分考虑与国际重力位模型的统一与衔接,引入全球地球重力位模型作为参考框架,优化高程系统与重力场的融合表达。同时,对青藏高原、川滇地震带等地质活跃区实行定期一等水准复测。四是开展航空重力测量,在陆海交界等难以实施地面重力测量的区域,利用航空重力技术快速获取高精度重力场数据,填补重力空白区,构建陆海统一的重力基准,为区域大地水准面精化与高程基准三维立体化构建提供支撑。五是结合时序InSAR、GRACE/GRACE-FO重力卫星和北斗/GNSS实时形变监测,采用机器学习算法从海量时序数据中自动识别异常形变模式,构建地面沉降智能监测业务化体系,实现大范围、高分辨率、毫米级年沉降速率测量,为城市轨道交通、高速铁路、南水北调、西电东送等重大工程提供毫米级预警服务<sup>[58]</sup>。六是研制精度优于5 cm的全国似大地水准面模型,支持高精度地理空间定位与测量,为卫星遥感、全球定位系统等现代测绘技术提供更精确、更全面的高程数据。

重力基准建设呈现出一条从绝对测量基准的确立到国家基本网的加密与升级,再到动态化与全球化融合的发展道路。近年来,国际重力基准正迈向量子化、网络化新阶段。法国MIGA量子重力传感器阵列已进入地下部署阶段,其目标是实现 $10^{-9}$  m/s<sup>2</sup>分辨率的重力梯度监测<sup>[59]</sup>。国际大地测量与地球物理联合会决议自2025年起强制采用IGRF 2025,要求全球重力数据统一归算至新的绝

对基准。加拿大ONC在胡安德富卡板块布设的深海重力仪,已实现对慢滑移事件的厘米级重力前兆捕捉<sup>[60]</sup>。中国重力基准的发展应紧随国际发展趋势,围绕海陆空一体化、微伽级动态维持、国产化自主可控等战略目标以及基准的动态维持展开。通过建立连续运行的重力基准站网来监测重力场随时间的变化,同时,积极融入国际重力参考系统,利用卫星重力、航空重力等新技术手段向全球范围扩展,构建一个覆盖全国、现势性强、与全球基准无缝衔接的高精度重力基准框架,为大地测量、地球科学、资源勘探和国防建设提供不可或缺的基础数据支撑。

建设重力基准的主要任务,一是持续运维并扩展超导重力基准站,开展国内外超导重力站联合观测与技术比对,提升亚微伽级长期稳定观测能力,融入全球重力基准网络。二是基于国家重力基准网,搭建重力一等网,覆盖大陆主要构造单元、资源富集区及重大工程走廊,实现 $10^{-8}$  m/s<sup>2</sup>~ $2\times 10^{-8}$  m/s<sup>2</sup>精度的骨架控制,为资源勘探、国防安全和地学研究提供厘米级大地水准面与微伽级重力基准保障。三是研制新一代重力基准网、超导重力连续监测、全国三维重力异常格网、重力异常变化格网及高阶地球重力场模型等基准产品,满足数字孪生城市、海洋强国、地质灾害防治和碳汇监测等国家重大工程的多样化需求。

深度基准的发展呈从区域分散到全国统一、从理论方法革新到技术应用深化、积极与国际接轨的趋势。国际深度基准的建设聚焦于全球无缝与实时智能化。例如,IHO与IAG联合设立的全局垂直基准工作组,计划在2028年发布首版全球陆海统一垂直基准模型,采用卫星测高、GNSS-R和数值模式同化技术,实现近岸5 cm精度<sup>[61]</sup>;美国NOAA利用CYGNSS卫星数据建立全球离岸200 km范围内的实时潮位反演系统,数据延迟仅为15 min<sup>[62]</sup>;日本海上保安厅正推进“海啸监测增强计划”,在太平洋俯冲带布设光纤-声学复合海底基准网,实现毫米级垂直位移监测。中国应尽快以南海深度基准为区域核心节点,提升基于北斗的GNSS-R自主观测能力,解决全球导航卫星系统测得的水深与海图基准之间无法进行高效转换的难题,满足航海保障、海洋工程和科学研究等多领域对高精度海洋空间信息的迫切需求。

深度基准建设的主要任务,一是以中国数百个长期验潮站与沿海GNSS基准站为基础,再增设百余个GNSS-R站,并与验潮站并置,作为陆海大地基准控制及深度基准控制连续观测站,构筑覆

盖1.8万km的大陆岸线、海南岛、台湾岛、南海诸岛及全部管辖海域的“全国深度基准控制网”，提升分钟级潮位、秒级三维坐标和毫米级垂直位移的常态化监测能力。二是投放一批集成声学验潮、压力验潮、GNSS浮标与北斗短报文回传的海洋浮标观测系统，探索GNSS-R遥感反演的AI增强技术，实时反演岸边及远海潮位，拓展基准监测的时空覆盖范围，实现从河口到周围专属经济区潮位、深度基准数据的无缝覆盖和分钟级更新。三是基于30年以上卫星测高数据、GOCE/GRACE-FO重力场模型、沿岸与海底GNSS-A水准联测、长期验潮序列及区域海洋数值模式，对平均海面、大地水准面、深度基准面（理论最低潮面）与平均大潮高潮面进行一体化精化，构建水平分辨率优于2'×2'、垂向精度优于5cm的精密海洋潮汐模型和实时水位预报系统。研制高程基准与深度基准的动态转换模型，实现潮位、水深、地形、遥感影像的瞬时统一，满足陆海自然资源统一确权登记、海岸带生态修复、港口航道智慧运维、海上风电与油气平台精准布设、风暴潮与海啸预警等国家重大工程及科研需求<sup>[63]</sup>。

为满足“数字中国”和“智慧社会”的建设需求，中国空间基准服务系统正由“静态、分级、事后”向“实时、智能、协同”全面升级。其核心任务是构建贯通“国家-省-行业”的空间基准服务云，即以国家主节点为算力与数据中枢，科学分析节点承担地球动力学解译及模型精化，完成数据处理节点边缘计算与产品快速封装，实现基准数据的分钟级处理、秒级推送和事后毫米级精化，为GNSS-RTK、InSAR、无人机、自动驾驶用户提供即插即用的智能化服务。依托全国GNSS连续运行基准站网、卫星测高、绝对重力及水准复测，打造国家与地方联动的空间基准监测与更新平台，快速捕捉区域基准形变，并自动触发省级控制网的增量更新，确保基准的精度优于1cm。迭代升级配套基准标准体系，对既有规范进行“数字孪生化”改造。在此基础之上，面向地质灾害、地下水超采、地震前兆、水利枢纽安全等行业场景，提供厘米级位移、毫米级沉降和微伽级重力变化的在线监测与预警分析，为防灾减灾、资源管理和重大工程建设提供全过程、全要素、可信赖的时空基准支撑。

除上述五个方面的任务设计外，中国空间基准正由传统“陆域-近海”二维框架升级为向“地球-月球-深空”全链路、全时空、全要素的空间基

准体系升级，呈“四维动态、厘米级无缝、量子级精度”的发展趋势。

室内地下空间基准是室外地上空间基准的自然延伸，也是构建部件级实景三维模型的核心基础。其建立主要依赖UWB和伪卫星等先进定位技术。通过这些技术与室外GNSS、全站仪、水准测量等传统测量手段结合，可实现地上、地下、室内空间的厘米级无缝定位。室内外地下基准的主要任务是选择具有代表性的室内和地下空间（如大型场馆、城市地下空间、智能化示范煤矿等），将室外基准和地面基准延伸至室内空间和地下空间。通过开展GNSS、全站仪和水准联系测量等工作，构建室内外地上下相统一的空间基准。同时，建立室内空间基准服务网和地下空间基准服务网，布设UWB/伪卫星连续运行基站，精确测定基站坐标。利用激光扫描测量技术构建数字孪生地图，以满足不同场景下的高精度定位需求和工程应用，为建设虚拟空间基准奠定基础。

海洋立体基准建设的任务是构建由海面GNSS浮标、海中潜标以及海底基准站共同组成的综合测量系统。其中，海面GNSS浮标既可用于维护海洋大地基准，又可用于监测海面的动态变化；海中潜标可用于测量海洋内部的物理特性，例如温度、盐度和流速等；海底基准站则可为海洋深度测量提供稳定的参考点，满足海底地形测绘的高精度要求。同时，着力提升海底坐标框架精度至厘米级，为海洋科学研究、海洋资源开发、海洋工程建设以及海洋生态保护等领域提供高精度时空基准。

中国月球基准的建设，呈从单一参数测量向系统性、集成化时空基准体系演变的进程，旨在构建与地球基准类似但又能充分适应月球环境的高精度参考框架。其核心任务紧密围绕三方面开展。一是建立以月面控制网和月基观测技术为支撑的月球坐标框架，为所有月面与轨道活动提供统一的几何基准。二是精化月球重力场模型，深刻揭示月球内部质量分布与动力学特征，形成关键物理基准。三是集成前两者数据，生产高精度的月球历表产品，精确描述月球及其探测器的轨道与位置动态。这三大核心任务的有机协同，是搭建未来月球科研站、实现资源勘查和载人探索的基础。

中国深空基准呈从依赖国际数据到以国内观测为主、从单一技术到多源融合的发展趋势。其核心目标是构建高精度、动态且能支撑未来深远

空间探索的自主时空基准体系。这一体系深度依赖中国甚长基线干涉测量网、脉冲星计时观测,以及月球和深空探测任务等天基与地基观测网络,通过多波段、多信使数据的融合处理,不断提升其精度、稳定性和可靠性。其主要任务一是建立并持续精化自主高精度天球参考框架,为精确描述天体位置和航天器轨道提供不可或缺的基准参照;二是基于中国深空探测的实测数据,自主生产并精化以月球、火星等太阳系天体为核心的行星历表,为月球基地建设、行星际飞行和着陆探测等任务提供精确的轨道设计与导航基础。这两大任务的协同推进,可为中国探索更远深空奠定基础<sup>[64]</sup>。

### 3 结论

全域数字空间基准作为建设数字中国的核心空间基础设施,是实现物理空间与数字空间高精度映射、多源数据融合及智能服务的统一时空底座。目前,中国已在大地、高程、重力、深度等基准领域构建了覆盖陆海空天的厘米级精度基础框架,初步具备了动态更新与多技术融合的观测能力。然而,面对数字孪生、元宇宙等新兴技术对全域、全时、全要素精度的更高要求,现有体系在基准统一性、动态维持能力、跨域协同服务等方面仍存在明显短板。

未来全域数字空间基准的发展应聚焦“高精度、动态化、智能化、一体化”方向,主动融入国家数据要素市场化改革进程,重点推进以下任务:构建毫米级历元坐标框架与陆海空天一体的动态大地基准;建立光钟控制网与沉降监测网相结合的高程基准分层架构;完善微伽级重力基准体系并加密中国重力基准网;推动深度基准由沿岸静态向全球互联、动态无缝方向发展;建设实时智能协同的空间基准服务云平台,同时,布局AI大模型驱动的基准场智能预报与量子增强的精密测量计算,加快构建覆盖室内地下、海洋立体、月球及深空的全链路基准体系,推动基准服务由“静态事后”向“实时智能”全面升级。

随着技术的进步和应用场景的拓展,全域数字空间基准将在更多领域发挥关键作用。量子重力仪、冷原子钟、AI大模型等前沿技术的发展,将进一步提升基准的精度和可靠性。特别是AI技术,将在重力场时变预测、高程异常智能修正、地质灾害前兆信息捕获等方面实现自适应修正与提前预警,为空间基准的应用带来更广阔的空间。

### 参考文献(References):

- [1] 周立,谢宏全,董春来,等. CORS维持陆海一体化空间基准研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(6): 19-20, 31.  
ZHOU Li, XIE Hongquan, DONG Chunlai, et al. Integrative land and sea model of space datum by CORS[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(6): 19-20, 31.
- [2] 郑小梅, 邓小军, 史秀保, 等. 宁波市数字孪生空间底座建设及应用赋能[J]. 测绘通报, 2025(5): 172-174, 179.  
ZHENG Xiaomei, DENG Xiaojun, SHI Xiubao, et al. Construction and application empowerment of the digital twin space base in Ningbo city[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2025(5): 172-174, 179.
- [3] 李建成. 时空基准: 全球竞相布局的重大基础设施[J]. 科学中国人, 2024(12): 22-23.  
LI Jiancheng. Spatiotemporal reference frame: a major infrastructure competitively deployed globally[J]. Scientific Chinese, 2024(12): 22-23.
- [4] 杨元喜, 明锋. 中国时空基准建设现状与未来发展[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(9): 2192-2195.  
YANG Yuanxi, MING Feng. Current status and future development of spatiotemporal datum construction in China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2023, 53(9): 2192-2195.
- [5] 陈俊勇, 杨元喜, 王敏, 等. 2000 国家大地控制网的构建和它的技术进步[J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 1-8.  
CHEN Junyong, YANG Yuanxi, WANG Min, et al. Establishment of 2000 national geodetic control network of China and its technological progress[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1): 1-8.
- [6] 肖伟刚. 中国科学院为北斗卫星导航系统时空基准相关技术提供基础性支撑[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(9): 1156-1162.  
XIAO Weigang. CAS provides basic support for space-time datum of BDS[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(9): 1156-1162.
- [7] ALTAMIMI Z, REBISCHUNG P, COLLILIEUX X, et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions[J]. Journal of Geodesy, 2023, 97: 47.
- [8] BÖHM J, BÖHM S, BOISITS J, et al. Vienna VLBI and satellite software (VieVS) for geodesy and astrometry[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2018, 130: 044503.
- [9] KERN L, KRÁSNÁ H, NOTHNAGEL A, et al. Terrestrial reference frame scale drift anomalies in VLBI and the contribution of Ny-Ålesund radio telescopes[J]. Earth, Planets and Space, 2025, 77: 40.
- [10] 李德仁, 苗前军, 邵振峰. 信息化测绘体系的定位与框架[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(3): 189-192, 196.  
LI Deren, MIAO Qianjun, SHAO Zhenfeng. Orientation and framework of geo-informatization system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(3): 189-192, 196.
- [11] 李金岭, 魏二虎, 孙中苗, 等. 关于我国天测与测地 VLBI 网络未来建设的讨论[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(6): 670-673.  
LI Jinling, WEI Erhu, SUN Zhongmiao, et al. Discussion on future configuration design of Chinese astrometric and geodetic VLBI

- network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 670-673.
- [12] 宁津生, 王华, 程鹏飞, 等. 2000国家大地坐标系框架体系建设及其进展[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(5): 569-573.
- NING Jinsheng, WANG Hua, CHENG Pengfei, et al. System construction and its progress of China geodetic coordinate system 2000[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(5): 569-573.
- [13] 孙中苗, 范昊鹏. VLBI全球观测系统(VGOS)研究进展[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1346-1353.
- SUN Zhongmiao, FAN Haopeng. Research progress of VLBI global observing system (VGOS) [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1346-1353.
- [14] YANG Y X, QIN X P. Resilient observation models for seafloor geodetic positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95: 79.
- [15] 曾安敏, 杨元喜, 明锋, 等. 海底大地基准点圆走航模式定位模型及分析[J]. *测绘学报*, 2021, 50(7): 939-952.
- ZENG Anmin, YANG Yuanxi, MING Feng, et al. Positioning model and analysis of the sailing circle mode of seafloor geodetic datum points[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(7): 939-952.
- [16] 李金岭, 黄飞, 孙中苗. Ka波段天测与测地VLBI观测的利弊分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2017, 42(2): 257-262.
- LI Jinling, HUANG Fei, SUN Zhongmiao. Analysis of the advantages and disadvantages of astrometric and geodetic VLBI observation at Ka-band[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 257-262.
- [17] MEINDL M, BEUTLER G, THALLER D, et al. A comment on the article "a collinearity diagnosis of the GNSS geocenter determination" by P. Rebischung, Z. Altamimi, and T. Springer[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(2): 189-194.
- [18] SÁNCHEZ L, ÁGREN J, HUANG J L, et al. Strategy for the realisation of the international height reference system (IHRs)[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(3): 33.
- [19] 赫林, 褚永海, 徐新禹, 等. GRACE/GOCE扩展重力场模型确定我国1985高程基准重力位的精度分析[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(6): 2016-2026.
- HE Lin, CHU Yonghai, XU Xinyu, et al. Evaluation of the GRACE/GOCE Global Geopotential Model on estimation of the geopotential value for the China vertical datum of 1985[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(6): 2016-2026.
- [20] 党亚民, 蒋涛, 陈俊勇. 全球高程基准研究进展[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, 47(10): 1576-1586.
- DANG Yamin, JIANG Tao, CHEN Junyong. Review on research progress of the global height datum[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1576-1586.
- [21] 党亚民, 蒋涛, 杨元喜, 等. 中国大地测量研究进展(2019—2023)[J]. *测绘学报*, 2023, 52(9): 1419-1436.
- DANG Yamin, JIANG Tao, YANG Yuanxi, et al. Research progress of geodesy in China (2019—2023) [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(9): 1419-1436.
- [22] 窦超, 安向东, 赵利江, 等. 格尔木市高精度数字高程基准模型研究[J]. *测绘通报*, 2020(8): 108-111.
- DOU Chao, AN Xiangdong, ZHAO Lijiang, et al. Research on the establishment of digital height datum in Golmud[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(8): 108-111.
- [23] 姜卫平, 李昭, 魏娜, 等. 大地测量坐标框架建立的进展与思考[J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1259-1270.
- JIANG Weiping, LI Zhao, WEI Na, et al. Progress and thoughts on establishment of geodetic coordinate frame[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1259-1270.
- [24] 柯灏, 赵建虎, 周丰年, 等. 联合大地水准面、海面地形和潮汐运动数值模拟的长江口陆海垂直基准转换关系[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, 47(5): 731-737, 746.
- KE Hao, ZHAO Jianhu, ZHOU Fengnian, et al. Establishment of sea-land vertical datum transformation for hydrography combining with geoid, sea surface topography and numerical simulation of tidal wave motion in the Yangtze estuarine waters[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(5): 731-737, 746.
- [25] WZIONTEK H, BONVALOT S, FALK R, et al. Status of the international gravity reference system and frame[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95: 7.
- [26] SANDWELL D T, MÜLLER R D, SMITH W H F, et al. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure[J]. *Science*, 2014, 346(6205): 65-67.
- [27] PURNELL D, GOMEZ N, CHAN N H, et al. Quantifying the uncertainty in ground-based GNSS-reflectometry sea level measurements[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 4419-4428.
- [28] 柯灏, 吴敬文, 李斐, 等. 基于潮汐运动三维数值模拟的海洋连续深度基准面建立方法研究[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(6): 2220-2226.
- KE Hao, WU Jingwen, LI Fei, et al. Study on the establishment of the oceanic continuous chart datum based on three-dimensional numerical simulation of tidal wave motion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(6): 2220-2226.
- [29] 鲍李峰, 席梦寒, 翟振和, 等. 走向深海, 发展自立自强的海底大地测量基准[J]. *中国科学基金*, 2024, 38(1): 182-192.
- BAO Lifeng, XI Menghan, ZHAI Zhenhe, et al. Developing self-reliant seafloor geodesy[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2024, 38(1): 182-192.
- [30] 郑楠. 海底大地基准点高精度定位关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2024: 30-50.
- [31] 石景元. 我国沿海深度基准面平衡与统一研究[J]. *中国海事*, 2024(4): 60-62.
- SHI Jingyuan. Study on balance and unification of chart datum in China's coastal areas[J]. *China Maritime Safety*, 2024(4): 60-62.
- [32] 王志云, 于申, 李守巨, 等. 地应力场反演分析的改进算法及其工程应用[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(4):

- 397-403.  
WANG Zhiyun, YU Shen, LI Shouju, et al. An improved algorithm for regression inversion analysis of ground stress field and its applications[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(4): 397-403.
- [33] 周兴华, 付延光, 许军. 海洋垂直基准研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1770-1777.  
ZHOU Xinghua, FU Yanguang, XU Jun. Progress and prospects in developing marine vertical datum[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1770-1777.
- [34] 刘经南, 陈冠旭, 赵建虎, 等. 海洋时空基准网的进展与趋势[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(1): 17-37.  
LIU Jingnan, CHEN Guanxu, ZHAO Jianhu, et al. Development and trends of marine space-time frame network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(1): 17-37.
- [35] 杨元喜, 刘焱雄, 孙大军, 等. 海底大地基准网建设及其关键技术[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(7): 936-945.  
YANG Yuanxi, LIU Yanxiong, SUN Dajun, et al. Seafloor geodetic network establishment and key technologies[J]. Scientia Sinica Terrae, 2020, 50(7): 936-945.
- [36] GUO X, LIAN Y D, SUN Y, et al. Assessment of the added value of the GOCE GPS data on the GRACE monthly gravity field solutions[J]. Remote Sensing, 2024, 16: 1586.
- [37] 暴景阳, 许军, 于彩霞. 海洋空间信息基准技术进展与发展方向[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1778-1785.  
BAO Jingyang, XU Jun, YU Caixia. Technical progress and development directions of oceanic spatial information datum[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1778-1785.
- [38] 易卿武, 黄璐, 蔚保国, 等. 面向室内地下遮蔽空间的定位可信性提升方法[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(5): 1529-1542.  
YI Qingwu, HUANG Lu, YU Baoguo, et al. Methods for enhancing positioning reliability in indoor and underground satellite-shielded environments[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2025, 47(5): 1529-1542.
- [39] 孙和平. 对我国重力学未来发展的几点思考[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(5): 881-890.  
SUN Heping. Some reflections on developing trend of gravimetry in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(5): 881-890.
- [40] 周会超, 郑晋军, 王海红, 等. 地月空间天基时空基准的构建与传递[J]. 中国空间科学技术, 2024, 44(3): 51-59.  
ZHOU Huichao, ZHENG Jinjun, WANG Haihong, et al. Construction and transfer of space-based spatial-temporal reference in Earth-Moon space[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3): 51-59.
- [41] 孙和平, 杨元喜, 叶朝辉, 等. 精密(量子)测量时代下时空基准研究中的关键科学问题和核心技术[J]. 中国科学基金, 2024, 38(1): 172-181.  
SUN Heping, YANG Yuanxi, YE Zhaohui, et al. Key scientific frontiers and core technologies in space-time reference research in the era of precision(quantum)measurement[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2024, 38(1): 172-181.
- [42] 蔡志武, 袁海波, 张升康. 时间基准的现在和未来[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(3): 21-28.  
CAI Zhiwu, YUAN Haibo, ZHANG Shengkang. Present and future of time standard[J]. Navigation Positioning and Timing, 2023, 10(3): 21-28.
- [43] 刘纪平, 周婷婷, 刘坡, 等. 实景三维地理实体建模的思考与实践[J]. 测绘学报, 2025, 54(4): 650-660.  
LIU Jiping, ZHOU Tingting, LIU Po, et al. Reflections and practices in 3D realistic geospatial scene geographic entity modeling[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2025, 54(4): 650-660.
- [44] 刘俊伟, 郭大海, 曲冠晨, 等. 一种顾及多领域的实景三维地理实体关系语义建模框架研究[J]. 时空信息学报, 2025, 32(1): 52-61.  
LIU Junwei, GUO Dahai, QU Guanchen, et al. A framework of semantic modeling 3D realistic geospatial landscape model of geo-entity considering multiple fields[J]. Journal of Spatio-Temporal Information, 2025, 32(1): 52-61.
- [45] 杨鑑, 高凯, 孙逸峰, 等. 面向空间科学领域的命名实体识别技术发展与应用展望[J]. 空间科学与试验学报, 2025, 2(2): 62-72.  
YANG Jian, GAO Kai, SUN Yifeng, et al. Development and application prospects of named entity recognition technology in the field of space science[J]. Journal of Space Science and Experiment, 2025, 2(2): 62-72.
- [46] 靖常峰, 李佳宁, 吴森森, 等. 基于对象空间的地理场景表达模型与组织管理方法及应用[J]. 地理学报, 2024, 79(9): 2230-2245.  
JING Changfeng, LI Jianing, WU Sensen, et al. Organization and management of geographic scenes based on object space[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(9): 2230-2245.
- [47] 朱红春, 张怡宁, 徐月雪, 等. 地形场景的地理空间认知与内容表达[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(4): 790-798.  
ZHU Hongchun, ZHANG Yining, XU Yuexue, et al. Research on geospatial cognition and content expression of terrain scenes[J]. Journal of Geo-Information Science, 2024(4): 790-798.
- [48] 孙剑, 秦国阳. 道路交通系统数字孪生: 概念、成熟度分级与研究展望[J]. 中国公路学报, 2024, 37(7): 218-236.  
SUN Jian, QIN Guoyang. Digital twins for traffic systems: concept, levels of technical maturity, and research directions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(7): 218-236.
- [49] 吴田军, 骆剑承, 李曼嘉, 等. 地理时空数字化底座理论框架构建与应用实践[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(4): 799-830.  
WU Tianjun, LUO Jiancheng, LI Manjia, et al. Theoretical framework construction and application practice of the geographic spatiotemporal digital base[J]. Journal of Geo-Information Science, 2024, 26(4): 799-830.
- [50] 杨元喜. 地理空间数字孪生与时空智能[J]. 测绘学报, 2025, 54(2): 213-220.  
YANG Yuanxi. Digital twin and spatio-temporal intelligence of geospatial information system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2025, 54(2): 213-220.

- [51] 刘海蛟,刘硕,刘文学,等.北斗+5G融合定位技术研究[J].信息技术与政策,2021,47(9):41-46.  
LIU Haijiao, LIU Shuo, LIU Wenxue, et al. Research on positioning technology of Beidou satellite navigation system+5G[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021, 47 (9):41-46.
- [52] 宋伟伟,林巍,楼益栋,等.北斗+5G时空基准的TDOA定位方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1170-1179.  
SONG Weiwei, LIN Wei, LOU Yidong, et al. TDOA positioning with BDS+5G space-time datum[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7):1170-1179.
- [53] 李东,毛之琳,廖文兵.“数字城市”地理空间数据基准研究[J].测绘与空间地理信息,2012,35(3):37-40.  
LI Dong, MAO Zhilin, LIAO Wenbing. Research on “digital city” geospatial data[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(3):37-40.
- [54] 姜卫平,马一方,邓连生,等.毫米级地球参考框架的建立方法与展望[J].测绘地理信息,2016,41(4):1-6,12.  
JIANG Weiping, MA Yifang, DENG Liansheng, et al. Establishment of mm-level terrestrial reference frame and its prospect[J]. Journal of Geomatics, 2016, 41(4):1-6, 12.
- [55] LI Z Y, SHAHIDEHPOUR M, LIU X. Cyber-secure decentralized energy management for IoT-enabled active distribution networks [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6 (5):900-917.
- [56] CESARE S, ALLASIO A, ANSELMINI A, et al. The European way to gravimetry: from GOCE to NGGM[J]. Advances in Space Research, 2016, 57:1047-1064.
- [57] REVERT CALABUIG N, LAAROSI I, ÁLVAREZ GONZÁLEZ A, et al. Development of a low-cost smart sensor GNSS system for real-time positioning and orientation for floating offshore wind platform[J]. Sensors, 2023, 23:925.
- [58] 杜钊锋,李国鹏,刘站科,等.国家重点沉降区域多监测手段综合分析[J].测绘学报,2025,54(3):481-492.  
DU Zhaofeng, LI Guopeng, LIU Zhanke, et al. Comprehensive analysis of multiple monitoring methods in main subsidence areas [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2025, 54(3):481-492.
- [59] 解加粉,孙如瑶,陈建忠,等.一种区域高程基准动态监测方法——以山东省为例[J].大地测量与地球动力学,2025,45(3):308-312,324.  
XIE Jiafen, SUN Ruyao, CHEN Jianzhong, et al. A dynamic monitoring method for regional elevation datum: taking Shandong Province as an example[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2025, 45(3):308-312, 324.
- [60] 郭鑫伟,郭春喜,聂建亮,等.一等水准成果构建的中国大陆垂直运动模型研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2022,47(3):361-368.  
GUO Xinwei, GUO Chunxi, NIE Jianliang, et al. Vertical movement model in Chinese mainland based on first order leveling results[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47 (3):361-368.
- [61] 邢乐林,李辉,李建国,等.陆态网络绝对重力基准的建立及应用[J].测绘学报,2016,45(5):538-543.  
XING Lelin, LI Hui, LI Jianguo, et al. Establishment of absolute gravity datum in CMONOC and its application[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(5):538-543.
- [62] 付广裕.中国地震重力研究现状及其面临的挑战[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(6):858-869.  
FU Guangyu. Status and challenges of Chinese gravity observation for seismic events[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(6):858-869.
- [63] 张济勇,刘冬晖,陈冠旭,等.基于参数搜索的水声定位时标跳变改正方法[J].大地测量与地球动力学,2024,44(8):810-814.  
ZHANG Jiyong, LIU Donghui, CHEN Guanxu, et al. Correction method for time stamp jumps in acoustic positioning based on parameter search[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2024, 44 (8):810-814.
- [64] 杨元喜,徐天河,薛树强.我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望[J].测绘学报,2017,46(1):1-8.  
YANG Yuanxi, XU Tianhe, XUE Shuqiang. Progresses and prospects in developing marine geodetic datum and marine navigation of China[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(1):1-8.