引用格式：孙和平. 对我国重力学未来发展的几点思考. 中国科学院院刊, 2024, 39(5): 881-890, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240108003.
Sun H P. Some reflections on developing trend of gravimetry in China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(5): 881-890, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240108003. (in Chinese)

对我国重力学未来发展的几点思考

孙和平

1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院　大地测量与地球动力学国家重点实验室　武汉　430077

2 中国科学院大学　地球与行星科学学院　北京　100049

摘要　随着现代科技的发展，重力学与地震学、地质学、基础物理学、地球动力学、水文学、海洋学和天文学等众多学科交叉融合并蓬勃发展，是服务国家测绘基准、资源勘探、军事安全及灾害监测等战略需求和基础地球科学问题研究的关键学科，因此掌握重力学的核心技术是国家核心竞争力的重要体现。文章在分析我国重力学学科发展的历史、现状、机遇与挑战的基础上，提出了重力学学科未来发展方向与重点思考内容，涉及海陆天空一体化的立体重力观测技术，海陆天空统一的大地测量重力基准网，地球系统质量迁移与青藏高原动力学问题研究，面向国防安全与太空的重力学，以及发展人工智能等新技术在重力学研究中的应用等。

关键词　重力学，海陆天空一体化，重力基准

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20240108003

CSTR　32128.14.CASbulletin.20240108003

重力学是地球物理学重、磁、电、震、热等5个重要学科分支之一，也是物理大地测量学的核心内容，它是研究地球重力场的时空变化特征及其力学机制的一门重要学科。重力学始于伽利略和牛顿时代，随着现代科学和观测技术的快速发展，重力学近年来又被赋予了全新的内涵，显现出巨大生命力，与众多学科如地震学、地质学、基础物理学、地球动力学、水文学、海洋学和天文学等形成了紧密的联系，因而，重力学既是一门蓬勃发展的古老学科，又是一门具有强劲生命力的新兴交叉学科。

资助项目：国家自然科学基金战略研究项目（42242015），国家自然科学基金重大项目（42192535），珞珈实验室开放基金（220100033）

修改稿收到日期：2024年4月28日

研究地球重力场及其时变特征需要在全球开展广泛的重力测量。然而，在空间观测技术发展之前，全球覆盖的高空间分辨率的重力数据是十分缺乏的。在过去的几百年间，重力测量几乎是重力学的全部内容，因此重力学又被称为重力测量学。随着近现代科技水平的提升，作为获取重力数据的手段，重力测量已经成为重力学中的一个基础部分，重力学与众多学科产生的交叉融合，使得重力测量学这个称谓已不能涵盖重力学的全部内容。

现代重力学是可以应用于研究地球整体形状、地球系统质量分布与迁移、不同尺度的形变运动等与密度结构相关的重要科学问题，在确定大地水准面、建立国家测绘基准及其动态变化、资源能源勘探、军事工程探测、水下航行器导航、中远程导弹的精确制导和空间飞行器等轨道的精准定位、全球水循环、气候变化及地质灾害监测等领域，发挥着其他学科不可替代的重要作用。

1 重力学的发展、现状与趋势

重力学的发展是从地表重力测量开始的，最早期的设备是利用金属摆来实施重力测量，摆的使用历经了200多年的时间，在此期间取得了许多重大的发现，也推动了相关理论的发展。拉格朗日、拉普拉斯、勒让德、泊松、高斯、格林等众多科学家为重力学理论的发展贡献了巨大的力量，特别是斯托克斯首先提出了利用重力观测确定大地水准面，莫洛金斯基进一步提出采用地面重力测量确定地球表面形状及外部重力场，这些研究奠定了现代高精度重力场模型的理论基础。

随着材料科学和技术的进一步发展，基于石英和金属弹簧，以及超导重力技术的相对重力仪及基于自由落体和精密光电技术的绝对重力仪相继发明，重力测量仪器的小型化、便携性为全球范围重力测量网络的构建创造了条件，也被广泛应用于大地测量学、地球物理学和地球动力学之中，其与海空移动平台的结合极大拓展了重力测量的应用范围。高精度绝对重力仪和超导重力仪的研制成功进一步为地球科学问题，特别是地球表面形变、地球自转和（深内部）动力学现象的观测与研究提供了重要的技术手段。当前欧美国家在重力测量仪器研制领域占据主导地位，例如，美国Micro-gLaCoste公司的弹簧重力仪（gPhone）、绝对重力仪（A10，FG-5X）、海空重力仪（SEA-III），以及美国GWR公司的超导重力仪（OSG，iGrav）均是目前精度最高及应用最为广泛的重力观测设备。

近半个世纪以来，空间观测技术的革新为重力学的发展作出了不可磨灭的贡献。欧美国家率先实施了CHAMP、GRACE/GRACE-FO、GOCE、Topex/Poseidon、Jason和SWOT等系列卫星重力和卫星测高计划。空间重力测量以其高覆盖率、高精度、高重复性使目前地球重力场的精度得到了非常大的提高，其观测效率也大为增加。重要的是，这些高精度的重力场及其时间变化已被广泛应用于地球物理学、地球动力学、水文学、气候学等相关研究之中，为多学科的交叉融合贡献了巨大的力量。此外，重力学的未来发展具有从区域重力走向聚焦全球重力发展态势，从地表重力走向聚焦海洋与空间重力发展态势，从聚焦地球走向其他星体的发展态势。

总的来说，重力学具有特定的理论体系，测量方法与技术，具备广泛的应用前景。图1给出了重力学学科体系梳理的示意图，以及重力测量技术、重力学研究的目标对象和研究方法等。重力学是以高精尖的观测技术为依托，以观测精度高、覆盖区域广、时间和空间分辨率高为特点，注重与其他学科深度的交叉融合，是一门具有广阔发展前景、具有其他学科不可替代的重要应用基础学科。

重力仪器的量子化、智能化、集成化和实用化是未来发展的重要趋势。近年来，物联网和人工智能迅猛发展，基于量子理论的新型重力仪的大力研发突破

了传统牛顿力学理论框架。例如，法国MuQuans公司已率先推出商用冷原子重力仪，我国多个研究机构与高校也相继开展了冷原子重力仪的研制，取得了重要进展。新兴技术不断涌现将对未来重力学的发展产生革命性影响。

2 我国重力学的发展、机遇与挑战

历史上，我国十分重视重力测量工作，我国最早的现代重力学研究始于20世纪50年代中期与苏联科学院地球物理所合作建立的全国重力基本点（联测中误差0.15 mGal）和一等点（联测中误差0.25 mGal），随后我国测绘部门建立了全国二等重力观测网（联测精度0.15 mGal），后来又进行了加密测量。20世纪50年代末建设了全国范围的天文重力水准网，如此大面积的观测网在世界上也是比较先进的，后续又完成了全国1°×1°和5°×5°的平均重力异常图[1]。

原国家测绘地理信息局先后组织建设了1957国家重力控制网、1985国家重力基本网和2000国家重力基本网等，并制定了《国家一等重力测量规范》（ZBA76001—87）、《国家重力测量控制规范》（GB/T 20256—2006）和《加密重力测量规范》（GB/T 17944—2000）等规章制度，明确了重力测量的目的、基本要求、标准化需求、测量内容、方法、技术指标与技术要求[2]。值得一提的是，重力测量在测定珠峰高程的过程中也发挥了重要作用。早期的重力测量主要采用国外仪器。国产仪器方面，国家地质总局地质仪器厂和原石油工业部石油仪器厂生产了ZS591、ZS2-67和ZSM-3型石英弹簧重力仪和金属弹簧重力仪，其中ZSM-3型仪器的精度达到了50 μgal；中国科学院测量与地球物理研究所相继成功研制了HSZ-2型海洋石英重力仪和ZYZY自动化远洋重力仪，精度达到3.1 mGal[1]。虽然我国在仪器研制方面与西方发达国家仍存在差距，但上述国产仪器的研制生产奠定了我国目前重力仪自主研发的基础。

根据苏联学者莫洛金斯基的理论，在方俊[3]的领导下，许厚泽[4-6]、宁津生[7-9]，李瑞浩[10]等开展了相关研究工作，制定了相应的垂线偏差和重力测量计划，提出了改进的实施方案以降低成本并提高效率。方俊[3]提出了著名的“方俊模板”以代替传统的莫洛金斯基双极模板。在此期间，我国学者在重力学理论方法方面也取得了丰硕成果，例如，许厚泽和朱灼文[11]导出了垂线偏差的最佳逼近公式，建立了统一的垂线偏差和高程异常逼近理论，利用单层位解决了地球扁率的影响[12]；方俊[3]对扁率级斯托克斯问题提供了新

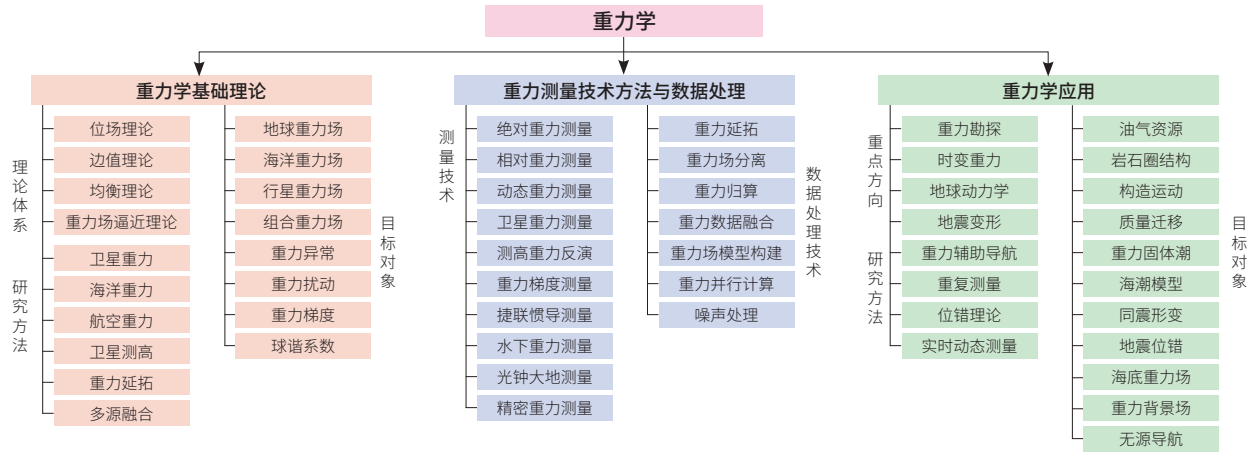


图1　重力学学科体系梳理.

Figure 1　Outline of discipline system for gravimetry

的解法。

在重力学理论发展的基础上，管泽霖和宁津生[13]给出了顾及地球扁率平方级的斯托克斯问题的解；宁津生等[14]提出了基于B样条函数的重力场逼近方法，发展了整体大地测量的理论，建立了新的模型并编制了相应软件应用于新建立的高精度大地测量实验网[15]。

我国第一个地球重力场模型于1971年由中国科学院测量与地球物理研究所构建[3]，该模型展开到16阶，包含229个位系数。1977年西安测绘研究所先后建立了2个地球重力场模型，分别展开到22和20阶，后来该所又陆续建立了新的模型。1989年原武汉测绘学院宁津生[7]等综合地面和空间重力测量数据，建立了我国首个高阶重力场模型，展开到180阶，该模型在表示我国局部重力场方面与国内外其他模型相比均具有明显优势。中国科学院测量与地球物理研究所在1993年构建了360阶的地球重力场模型，该模型在我国青藏高原地区具有较高的精度，因此在相关地区的地质构造和地球动力学研究方面发挥了重大的作用[4]。随后在1994年，武汉测绘科技大学和西安测绘研究所也分别建立了360阶的地球重力场模型[16,17]。李建成等[18]建立了局部重力场模型，并开展了大地水准面精化的研究。进入2000年后，随着系列重力卫星计划的实施，国内外研究机构推出了许多高阶静态重力场模型，相比以前的模型，这些模型的精度和分辨率都有了显著提高[19,20]。我国在重力卫星领域的发展相对滞后，在相关核心关键技术和原始数据获取等方面受到西方国家的封锁和限制，但在卫星重力测量数据处理方法和地球重力场建模水平方面已达到国际先进水平[20]。

我国开展的另一个重力学研究的内容是时变重力的研究，其代表是重力潮汐的研究。在方俊和许厚泽的带领下，中国科学院测量与地球物理研究所率先在国内开展了重力固体潮的研究[21]。与国际固体潮研究中心（ICET）开展合作，在我国东西和南北2条剖面上开展了重力潮汐观测与研究，在此基础上发展并改进了诸多观测数据处理的方法与技术[22-25]。值得一提的是，郗钦文[26]发展了引潮位展开理论，建立了高精度的引潮位展开表，该表目前是国际上被广泛使用的潮波表之一；李国营[27]用小参数扰动法建立了一套固体潮理论模拟方法，并改正了Wahr模型中的潮汐依赖参数。在这一时期，以拉科斯特ET型重力仪为主要的观测手段。随着超导重力仪的引进，在许厚泽和孙和平[28,29]的领导下，我国重力固体潮的研究进入了一个快速发展的阶段。超导重力仪以其观测精度高、稳定性好和漂移率低为特点，为重力固体潮研究提供了大量高质量的连续观测资料，为发现地球动力学现象引起的微弱信号创造了条件，如地球内核平动振荡信号的探测[30]。这一时期我国学者也开展了大气负荷、海潮负荷、陆地水负荷、地球自由核章动、地球自由振荡、地震和地球简正模信号检测等与重力场相关的研究工作[31-34]。首次利用重力技术探讨了核幔边界物性[35]。此外，得益于卫星重力的长期连续观测，全球性的重力场时变特征研究在我国也蓬勃地开展了起来，其中最主要的是对全球水分布的研究，包含大尺度的水系变化与冰川活动和中小尺度的高山冰川和湖泊水体变化，以及地球结构、构造活动和气候事件、地质灾害等相关研究[36-38]。我国在时变重力场相关的地球内部形变动力学理论和正演数据模拟方面已达到国际先进水平。

2000年后，以FG-5型绝对重力仪及LCR、CG6等型号的相对重力仪为代表的高精度仪器为我国开展大范围的重力网监测创造了条件，随着我国先后建成地壳运动观测网络和中国大陆构造环境监测网络，建立了高空间覆盖率的重力观测网络。相比早期的重力监测网，新建立的观测网络精度有了显著提高，这为监测我国重力场形态与变化特征，以及研究构造形变动力学问题发挥了巨大作用。国家“十二五”重大科

技基础设施项目——精密重力测量综合研究设施平台建设和基于第十届国际绝对重力比对基础上建立的全球重力基准原点（北京）也具有重要的战略意义。

尽管我国重力学在理论模型和观测网络建设方面已有长足的发展，但是在高精尖的观测技术领域仍然存在明显的不足，尤为重要的是我国自主研制科学仪器的研发进度缓慢，工艺技术仍相对落后。西方国家的绝对和相对重力测量技术已经非常成熟，量子重力技术已经取得突破性进展，重力梯度技术已经成功应用于矿产油气资源勘探和水下航行器辅助匹配导航，有效提高了其安全性和隐蔽性。我国重力观测技术和仪器则明显落后，最先进的技术均被西方国家垄断，特别是对于一些高端仪器设备，西方国家对我国采取禁运措施，这对我国重力观测技术提升和重力学学科发展形成了严峻的挑战。因此与仪器设计和制造相关的理论和技术需进一步加强，相关的工作亟需进一步开展。可喜的是，近10多年来，国内多家相关机构均已经开展了高精度重力仪的研制，包括传统的小型绝对重力仪、超导重力仪和海空重力仪，以及新型的微机电系统（MEMS）重力仪、量子重力仪和量子重力梯度仪[39-41]。从目前的情况来看，尽管目前的研制水平距离成熟产品的商品化有不少差距，但已取得了重要的进展，一些仪器已经在行业应用中发挥了重要作用。此外，在空间卫星重力测量方面，“天琴一号”和“天绘-4”等国产卫星的成功发射，已经实现了对地球重力场的自主观测[20]。

“十三五”时期，我国提出向地球深部进军，全面实施深地探测、深海探测、深空对地观测战略，这对重力学特别是重力学的应用领域提出了更高的要求，也为我国重力学的发展创造了良好的契机。如何使重力学的发展为我国在探测未知领域的进程中发挥更大的作用，是一个急需思考的战略和战术问题。重力学并不是一个独立发展的学科，因此，首先需要解决的是，在现有的理论和技术的基础上，如何与其他相关学科和先进技术进行有效融合弥补现有技术的不足，如何发展新的理论指导技术的进步，从而推动重力学更好地向前发展，服务于国家需求。

3 重力学未来发展方向

近年来，随着国家大量人力物力投入的增加，我国地球重力场领域的研究与应用发展迅速，在综合定位、导航、授时（PNT）系统，中国探月工程和航空航天等重大工程的实施中，地球重力场显示出了更加至关重要的作用。重力学的未来发展具有从区域重力走向聚焦全球重力发展态势，从地表重力走向聚焦海洋与空间重力发展态势，在应用方面有从静态重力场走向动态时变重力场的发展态势。因此，重力学的战略布局应强调技术发展和科学应用，需要针对相关重大基础与应用科学问题，进一步集中优势力量，深化重力学与其他学科的交叉融合，打造海陆天空一体化的重力场观测与研究体系，服务社会发展及国家战略需求。建议我国未来20年重力学发展方向的重要领域包括：

（1）海陆天空一体化的立体重力观测技术。卫星重力、地表重力和海空重力测量技术是未来获得高精度重力数据的必备条件，是学科发展的必然趋势，而其中自主技术的研发是关键。突破西方的重力测量技术垄断，优先支持绝对重力仪、海洋及航空重力仪的自主研发，推动下一代重力卫星任务，即通过引入多组多星座重力卫星来提升当前单组双星模式重力卫星的能力，联合我国的北斗系统为获取全球高分辨率的时变重力场奠定坚实的基础；加速陆地惯性重力、超导重力和全张量重力梯度测量等新测量技术的研发，提高重力观测精度，特别是高精度重力梯度仪的自主研制，为资源勘探服务，为增强我国的能源安全提供重要保障和支撑。在海空重力测量方面，一方面要结合人工智能和我国的先进无人机技术，大力发展高自动化、小型化的无人机载重力仪和重力梯度仪，发展

我国的航空重力测量技术；另一方面，发展高精度的船载海洋重力仪、海底方舱式、游曳式重力仪、重力梯度仪。大力发展量子重力仪，也包括大力发展原子钟与光钟技术，以广义相对论大地测量为基础实现亚厘米级大地水准面与全球高程基准的统一。

（2）海陆天空统一的大地测量重力基准网。推进重力学与大地测量学、海洋学、地震学、地磁学等的交叉与融合，发挥学科交叉的优势，构建综合立体多物理场观测基准观测网络，建立我国陆海统一的大地测量重力基准。加快推进卫星、航空、海面、陆地和海底重力的立体探测布局和体系建设，抓住下一代卫星重力任务的机遇，依托国际合作与自主发射卫星，获取高精度高分辨率全球和区域静态和时变重力场，满足地球科学和全球变化领域的应用需求，加快推进全球大地水准面确定、陆地和海洋重力基准及高程基准体系建设，在综合定位、导航、授时体系框架下，通过声学、量子等手段更快更好地建立海底基准网，从而构建全球1′×1′分辨率厘米级精度海洋大地水准面，并在陆海交界区域通过航空、地面、船载数据融合实现大地水准面精化，实现我国内海与陆地无缝衔接和覆盖极地、大洋和全球区域。

（3）地球系统质量迁移与青藏高原动力学问题研究。推进地球系统的物质分布与循环、地球圈层耦合运动、构造活动、极地冰川、地震灾害、陆地水储量、海平面上升、资源勘探和环境监测等前沿科学问题的应用研究。发展海底重力场变化的变形理论与建模和信号分离的方法。发展海陆天空重力数据及其他地球物理数据融合的处理技术与方法，推进物理大地测量边值问题严密化理论。推进超高阶地球重力场、时变重力场建模的理论与方法研究。青藏高原作为地球的第三极，其活跃的地质构造使得该地区成为地球科学研究的热点区域，因此对此区域开展深入的重力学研究可以很好的增强我国在相关科学研究中的影响力。布设青藏高原地区重力观测网，进行重力持续观测与复测，取得对青藏高原动力学深入的科学认知与理论突破。

（4）面向国防安全的重力学。重点布局基于重力技术的军事航天、地表测绘与空间基准、水下无源导航与海洋环境保障、海洋重力基准、海底静态和近海底动态测量、海洋重力场变化的探测、建模和分离的理论与方法。发展面向军事需求的重力学应用，重点发展矢量重力测量技术、全张量重力梯度测量和探测技术（包括垂线偏差）、惯性重力一体化测量技术、弹道导弹的重力保障技术、长航时潜艇水下重力辅助导航等技术，争取在重力场国防应用方面达到国际先进水平。

（5）面向月球和火星的重力学。重点布局地月系统引潮力场演变及其地质与地球物理效应，依托我国月球和火星探测任务，发挥重力学在月球及火星的圈层耦合、质量迁移、内部结构研究中的作用。发展月球和火星重力卫星探测技术与实施方案，为资源能源勘探服务。发展在不同力源耦合作用下的行星变形理论，建立适用于月球和火星的形变改正模型，服务国家深空探测的战略需求。随着我国载人登月和月球科学站建设计划的有序推进，开展月表原位多物理场探测是对月球进行勘探、开发，推动科学研究的必要途径。重力测量将在月球重力场、固体潮、垂直基准建设，以及资源开发等方面发挥重要作用，而相关设备在国内仍是空白，因此月球重力仪研发也显得非常迫切。

（6）发展人工智能等新技术在重力学研究中的应用。人工智能作为一个新兴的数据处理手段得到了越来越广泛的应用。随着技术的提高，未来将会产生海量的重力测量数据及辅助观测资料。因此，发挥人工智能在大数据处理上的优势能有效提升重力数据的应用及相关研究的开展。因此，大力发展与人工智能在重力学中的应用相关的理论方法尤为重要。

参考文献

1 方俊, 许厚泽, 张赤军. 我国地球形状及重力场研究的进展. 地球物理学报, 1979, 22(4): 321-325.
Fang J, Xu H Z, Zhang C J. Researches on gravimetry and figure of earth in China. Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica), 1979, 22(4): 321-325. (in Chinese)

2 郭春喜, 肖学年, 王斌. 国家标准《国家重力控制测量规范》制定的有关内容说明. 测绘标准化, 2005, 21(3): 3-5.
Guo C X, Xiao X N, Wang B. Commentary remarks on the contents of national specifications for gravity control measurement. Standardization for Surveying and Mapping, 2005, 21(3): 3-5. (in Chinese)

3 方俊. 方俊院士文集. 北京: 科学出版社, 2004.
Fang J. Collected Works of Academician Fang Jun. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)

4 许厚泽. 许厚泽院士文集. 北京: 科学出版社, 2014.
Xu H Z. Collected Works of Academician Hsu Houze. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)

5 许厚泽. 固体地球潮汐. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2010.
Xu H Z. Solid Earth Tides. Wuhan: Hubei Science & Technology Publishing House, 2010. (in Chinese)

6 Xu H Z, Sun H P, Xu J Q, et al. International tidal gravity reference values at Wuhan Station. Science in China Series D: Earth Sciences, 2000, 43(1): 77-83.

7 宁津生, 管泽霖. 重力学引论. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1989.
Ning J S, Guan Z L. Introduction to Gravimetry. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1989. (in Chinese)

8 宁津生. 跟踪世界发展动态 致力地球重力场研究. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(6): 471-474.
Ning J S. Following the developments of the world, devoting to the study on the earth gravity field. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(6): 471-474. (in Chinese)

9 管泽霖, 宁津生. 地球形状及外部重力场. 北京: 测绘出版社, 1981.
Guan Z L, Ning J S. The Shape of the Earth and External Gravity Field. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1981. (in Chinese)

10 李瑞浩. 重力学引论. 北京: 地震出版社, 1988.
Li R H. Introduction to Gravimetry. Beijing: Seismological Press, 1988. (in Chinese)

11 许厚泽, 朱灼文. 斯托克司函数逼近及截断误差估计. 地球物理学报, 1981, 24(1): 26-39.
Xu H Z, Zhu Z W. Approximation of stokes' function and estimation of truncation error. Chinese Journal of Geophysics, 1981, 24(1): 26-39. (in Chinese)

12 许厚泽, 朱灼文. 地球外部重力场的虚拟单层密度表示. 中国科学(B辑), 1984, (6): 575-580.
Xu H Z, Zhu Z W. Representation of gravity field outside the earth using fictitious single layer density. Scientia Sinica (Series B), 1984, (6): 575-580.

13 管泽霖, 宁津生. 关于顾及地球扁率平方级量的斯托克司问题的解. 武汉大学学报(信息科学版), 1981, 6(2): 1-9.
Guan Z L, Ning J S. On the Solution of the Stokes Problem with an Accuracy of the Order of Flatening Square. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1981, 6(2): 1-9. (in Chinese)

14 宁津生, 晁定波, 边少锋. 重力场的样条逼近. 测绘学报, 1990, 19(4): 241-249.
Ning J S, Chao D B, Bian S F. B-spline approximation of gravcity field. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1990, 19(4): 241-249. (in Chinese)

15 宁津生, 刘大杰, 晁定波. 整体大地测量的理论和实际应用. 测绘学报, 1993, 22(1): 10-18.
Ning J S, Liu D J, Chao D B. Theory of integrated geodesy and its practical application. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1993, 22(1): 10-18. (in Chinese)

16 宁津生, 李建成, 晁定波, 等. WDM94 360 阶地球重力场模型研究. 武汉大学学报(信息科学版), 1994, 19(4): 283-291.
Ning J S, Li J C, Chao D B, et al. The research of the Earth's gravity field model WDM94 complete to degree 360. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1994, 19(4): 283-291. (in Chinese)

17 夏哲仁, 林丽, 石磐. 360 阶地球重力场模型 DQM94A 及其精度分析. 地球物理学报, 1995, 38(6): 788-795.
Xia Z R, Lin L, Shi P. A new Earth's gravity field model

DQM94A and its precision estimation. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(6): 788-795. (in Chinese)

18 李建成, 宁津生. 局部大地水准面精化的理论和方法// 中国科学技术协会, 浙江省人民政府. 面向21世纪的科技进步与社会经济发展(上册). 北京: 测绘出版社, 1999.
Li J C, Ning J S. The theory and method of local geoid refinement// China Association for Science and Technology, People's Government of Zhejiang Province Technological Progress and Socio Economic Development for the 21st Century (Volume 1). Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999. (in Chinese)

19 沈云中, 许厚泽. 卫—卫跟踪重力卫星测量模式的模拟与精度分析// 大地测量与地球动力学进展. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2004: 211-218.
Shen Y Z, Hsu H Z. Simulation and accuracy analysis of satellite tracking gravity measurement mode// Progress in Geodesy and Geodynamics. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2004: 211-218. (in Chinese)

20 罗志才, 钟波, 周浩, 等. 利用卫星重力测量确定地球重力场模型的进展. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1713-1727.
Luo Z C, Zhong B, Zhou H, et al. Progress in determining the earth's gravity field model by satellite gravimetry. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1713-1727. (in Chinese)

21 Melchior P, 方俊, Ducarme B, 等. 中国固体潮观测研究. 地球物理学报, 1985, (2): 142-154.
Melchior P, Fang J, Ducarme B, et al. Studies on the earth tidal observations in China. Chinese Journal of Geophysics, 1985, (2): 142-154. (in Chinese)

22 Torge W, Roeder R H, Schnuêll M, et al. High precision gravity control network in Yunnan, China. University of Hannover, Germany, Bureau Gravimetrique International, 1993: 54-65.

23 Torge W, Roeder R H, Schnuêll M, et al. High precision gravity control network in Yunnan/China 1990. Bureau Gravimetry International Bulletin d'informations, 1990, 67: 118-127.

24 Takemoto S, Fukuda Y, Higashi T, et al. Establishment of an absolute gravity network in east- and southeast-Asia. Journal of the Geodetic Society of Japan, 2006, 52(1): 51-95.

25 Takemoto S, Sun H P. Japan-China collaboration project on precise gravity measurements in East Asia// Progress in Geodesy and Geodynamics. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2004: 138-144.

26 郝钦文. 精密引潮位展开及某些诠释. 地球物理学报, 1991, 34(2): 182-194.
Xi Q W. Precise development of the tidal generating potential and some explanatory notes. Chinese Journal of Geophysics, 1991, 34(2): 182-194. (in Chinese)

27 李国营, 彭龙辉, 许厚泽. 自转微椭、非均匀地球的潮汐变形. 地球物理学报, 1996, 39(5): 672-678.
Li G Y, Peng L H, Xu H Z. Tidal deformation of a self-rotating, elliptical, heterogeneous earth. Chinese Journal of Geophysics, 1996, 39(5): 672-678. (in Chinese)

28 Crossley D J, Hinderer J. Global Geodynamics Project-GGP: status report 1994// Proceedings of the workshop on non-tidal gravity changes, Luxembourg, 1995: 244-269.

29 孙和平, 徐建桥, 崔小明. 重力场的地球动力学与内部结构应用研究进展. 测绘学报, 2017, 46(10): 1290-1299.
Sun H P, Xu J Q, Cui X M. Research progress of the gravity field application in earth's geodynamics and interior structure. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1290-1299. (in Chinese)

30 Sun H P, Xu J Q, Ducarme B. Detection of the translational oscillations of the Earth's solid inner core based on the international superconducting gravimeter observations. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(11): 1165-1176.

31 孙和平, 徐建桥, Ducarme B. 基于全球超导重力仪观测资料考虑液核近周日共振效应的固体潮实验模型. 科学通报, 2003, 48(6): 610-614.
Sun H P, Xu J Q, Ducarme B. Experimental model of solid tide considering near-diurnal resonance effect of liquid core based on global superconducting gravimeter observation data. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 610-614.

32 徐建桥, 孙和平, 罗少聪. 利用国际超导重力仪观测资料研究地球自由核章动. 中国科学(D辑), 2001, (9): 719-726.
Xu J Q, Sun H P, Luo S C. Study of the Earth's free core nutation by tidal gravity data recorded with international superconducting gravimeters. Science in China (Series D),

2001, (9): 719-726. (in Chinese)

33 Lei X E, Xu H Z. Tri-frequency spectrum method and results for resolving the parameters of Earth's liquid core free nutation. Science in China (Series D), 2002, 45(4): 325-336.

34 Courtier N, Ducarme B, Goodkind J, et al. Global superconducting gravimeter observations and the search for the translational modes of the inner core. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2000, 117(1-4): 3-20.

35 Sun H P, Cui X M, Xu J Q, et al. Preliminary application of superconductive gravity technique on the investigation of viscosity at core-mantle boundary. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(2): 311-321.

36 Sun W K, Okubo S, Sugano T. Determining dislocation Love numbers using satellite gravity mission observations. Earth, Planets and Space, 2006, 58(5): 497-503.

37 Tang H, Sun W K. Theories and applications of earthquake-induced gravity variation: Advances and perspectives. Earthquake Science, 2023, 36(5): 376-415.

38 孙和平, 孙文科, 申文斌, 等. 地球重力场及其地学应用研究进展——2020中国地球科学联合学术年会专题综述. 地球科学进展, 2021, 36(5): 445-460.
Sun H P, Sun W K, Shen W B, et al. Research progress of earth's gravity field and its application in geosciences—A summary of annual meeting of Chinese Geoscience Union in 2020. Advances in Earth Science, 2021, 36(5): 445-460. (in Chinese)

39 Liu H F, Luo Z C, Hu Z K, et al. A review of high-performance MEMS sensors for resource exploration and geophysical applications. Petroleum Science, 2022, 19(6): 2631-2648.

40 Wu S Q, Feng J Y, Li C J, et al. The results of CCM. G-K2.2017 key comparison. Metrologia, 2020, 57(1A): 07002-07002.

41 Wu S Q, Feng J Y, Li C J, et al. The results of 10th International Comparison of Absolute Gravimeters (ICAG 2017). Journal of Geodesy, 2021, 95(6): 63.

Some reflections on developing trend of gravimetry in China

SUN Heping

（1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;

2 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract With the development of modern science and technology, gravimetry is growing vigorously and is increasingly becoming an interdisciplinary subject that is closely related to many others such as geology, fundamental physics, geodynamics, hydrology, oceanography, and astronomy. It is now a key subject in giving service to demands in national strategy and fundamental researches in geoscience such as fiducial surveying and mapping, resource exploration, military security, and hazard monitoring. Therefore, owning the core gravimetric techniques is one of the pivots which reflect national core competitiveness. This study first briefly overviews the history and actuality of the growth of gravimetry subject in China and analyzes the chances and challenges. Then some directions of the future developments in gravimetry in China are proposed and some thoughts are shared. These involve constructing gravimetric datum network and corresponding observational technology by unifying ocean-land-space-based means, investigating mass transfer in Earth system and Tibetan dynamics, enhancing contributions from gravimetry to national security and outer space exploration, as well as boosting applications of the artificial intelligence in gravimetry.

Keywords gravimetry, ocean-land-space-based unification, gravity datum

孙和平 中国科学院院士,中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研究员。从事地球动力学与微小形变的高精度重力信号检测、理论模拟和力学机制探索等工作。E-mail: heping@whigg.ac.cn

SUN Heping Academician of Chinese Academy of Sciences, Research Professor of Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS. His research focuses on geodynamics and detection of the tiny gravity variation due to the Earth's deformation by making use of gravimetric technique, as well as its mechanism and numerical simulations. E-mail: heping@whigg.ac.cn

■责任编辑：张帆