

重力场的时间变化 与地球动力学^{*}

孙和平

(中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量重点实验室 武汉 430077)

摘要 利用现代高精度重力场信息研究地球动力学问题是近年来国际地学领域前沿热点,除地震测量外,重力场为人们准确了解和深刻认识地球深内部构造提供又一有效工具。文章简要概述了利用超导重力仪开展重力场研究的背景和作用,介绍了国际发展现状和趋势以及我院近年来在知识创新工程重要方向性项目的支持下取得的主要研究成果,最后对如何进一步发挥重力场在地球动力学和国家需求方面的作用提出了几点建议。

关键词 重力场,地球动力学,研究现状,发展趋势

随着基础研究和空间技术对地球动力学和地球内部精细结构的需求日增,利用重力场手段研究相关问题就显得越来越重要。重力场是反映地球介质密度变化和各种环境(固体地球潮汐、内部热流、固体和液体之间的质量交换、表面负荷和地震构造运动等)下动力学特征的最基本和最直接的物理量。利用高精度重力手段对测定的物理量作归算,既可给出重力场高空赋值用以修正卫星和近地飞行器的轨道,也可用于反演地球动力学性质和三维密度不均匀性,对地球局部和整体的各种运动研究提供约束。由于地球对各种不同频率力源的响应反映了内部构造、物质分布和动力学特征,因此利用重力手段研究地学问题也是一种对地球响应问题的研究。

由于地球是由大气、海洋、固体地幔、液态外核

和固体内核等多个部分组成,各个圈层间存在着相互作用和耦合,它是一个十分复杂的动力学系统。研究表明,地球本体是一个近似的分层椭球体,不同层面具有不同的(弹性,非弹性,塑性甚至液态)物质构成。在日月等天体力源和各种区域及全球物理场变化的作用下,地球各圈层内的物质将不停地迁移,引起地球各圈层间自由或受迫的运动,所有这些将导致重力场的潮汐和非潮汐变化。主要表现为固体地球潮汐、地球自由振荡、地球自由(和受迫)章动、地球极移效应和钱德勒摆动、液态地核自由振荡、固态内核平动振荡和各种核模、构造运动和地壳长期形变、海平面变化、地震过程及其重力与海洋和大气的耦合效应等等。

1 国际研究现状和发展趋势

近 20 年来,随着电子技术的快速发展和数据处理技术的不断完善,地球动力学领域已经取得了许多重要成果,先进的观测技术为基础学科研究带来了革命性的进步。由美国 Micro-g 公司生产的新一代商业化 FG5 可移动激光式绝对重力仪 (AG) 的观测精度高达 10^{-8}m/s^2 ,而美国 GWR 公司生产的超

^{*} 收稿日期:2004 年 2 月 2 日

导重力仪(SG)的实验室观测精度已高达 10^{-11}m/s^2 。这些仪器的研制成功和广泛应用,为检测各种地球物理场和动力学现象导致的微小重力场变化提供了有效工具。中国科学院分别于 1985 年和 1995 年从美国引进了 SG 和 AG 观测设备,目前正在为承担的国家任务和国际合作研究发挥着重要作用。

为了推进地球动力学研究的深入,国际大地测量和地球物理联合会(IUGG)下属的地球深部研究小组组织实施了全球地球动力学项目(GGP),该项目 1997 年开始实施,参加者有美国、加拿大、德国、法国、比利时、芬兰、挪威、日本、中国、南非、印度尼西亚、澳大利亚、俄罗斯和南极等国家和地区。中国科学院是我国唯一参加该项目的机构,安装在武汉动力大地测量观测站的 SG 也是亚洲大陆地区唯一的一台仪器。由于其地理位置的重要性和获得的重要观测资料,该台站已经被国际大地测量协会列为国际重力潮汐基准站。GGP 在比利时皇家天文台设立了数据中心,利用全球 SG 高精度资料,实施同步的高密度采样和资料交换,并以前所未有的观测精度检测由于各种地球物理场和地球动力学现象诱发的重力场微小变化。GGP 研究内容包括:(1)液态地核存在的内重力波现象;(2)全球气压及其质量分布对重力场产生的影响;(3)地核近周日自由晃动和固态内核的平动振荡;(4)海洋潮汐和地下水位变化对重力场的影响;(5)地震过程、构造运动、海平面变化、冰后回弹过程伴随的重力场效应;(6)周期从分钟到年的地球自转轴位置变化特征等等。

不同频率的重力场变化具有特定的物理和力学含义,高精度 SG 可有效检测到不同的地球动力学现象。目前各国科学家正在从理论模拟和重力检测等不同途径探索地球内部构造和动力学特性,特别注意用全球和动态的理性思维,借助于现代先进观测技术深刻认识自然现象本质。固体地球潮汐的研究已经取得了令人欣喜的成果,人们已经建立了引潮位展开、天体力学和地球形变间的密切联系。引潮力是目前人们可提前精确描述的作用于地球上唯一的力源,由于重力场观测获得的是所有作用于地球体力源的总和,因此扣除已知的潮汐力,则

剩下的就是区域的和全球范围内的动力学现象产生的力源。尽管人们在地球液核和固态内核等动力学现象的理论和检测方面取得了一些重要成果,也在 *Science* 等国际一流期刊发表了多篇文章,但始终没有获得根本突破。尤其是固态内核动力学现象的力源问题仍处在争论阶段。因此国际科学界十分重视该学科的进展,日本政府投入大量经费,引进多台 SG,除了在本土的 3 个台站安装仪器外,还在印度尼西亚、澳大利亚、挪威和南极等海外国家和地区设立观测站,积极推进国际 GGP 计划的实施,期望给相关学科研究带来革命性的进展。

2 我院在该领域的近期研究进展

2.1 简要历史回顾

上个世纪 70 年代末,在许厚泽院士领导下,中国科学院在与比利时皇家天文台和国际地球潮汐中心合作基础上,在国内首次建立了包括北京、武汉、广州、上海、兰州、乌鲁木齐、沈阳、青岛等观测站在内的重力潮汐剖面。80 年代,先后完成了我国沿海南北向及沿 30° 纬线东西向重力潮汐剖面,除在中比合作的台站实施重力测量外,还包括合肥、郑州、万县、成都、拉萨、敦煌、泉州和三亚等。1985—1988 年间,开展了与德国 Damstadt 理工大学和英国海洋科学研究所的合作,分别用德国、英国和我国的仪器开展对比观测。90 年代开始,中国科学院在国内首先将地球重力场的时间变化研究逐步应用到地球动力学领域,特别是在一些地球内部动力学现象的解释方面。

近年来,中国科学院非常重视重力场与地球动力学问题研究项目,也采取了一系列有效措施来推动我国在该领域的发展。主要从事地球动力学研究的院动力大地测量重点实验室在 1999 年就被列入中国科学院首批知识创新工程试点序列。陈宜瑜和白春礼等院领导多次到测地所视察和指导工作,并对开展动力大地测量学的研究作了重要指示。院资源环境科学与技术局专门设立“国际地球动力学合作观测与研究”重点和知识创新工程重要方向性项目“地球深内部结构和动力学研究”。在各级领导的

支持下,重力场与地球动力学研究已经取得了一些较重要的进展。

2.2 固体地球潮汐和自由核章动

地表某点的重力场通常包括地球引力和地球旋转导致的惯性离心力两部分,除此以外还存在日(月)和其它天体的引力以及系统平动有关的惯性力,后两个力的合力称为引潮力。在引潮力作用下地球内部和外部形状将时刻发生周期性变化,这种现象被称为固体潮。固体潮的存在伴随各种诸如重力、倾斜和应变等地球物理场现象,因此利用这些地球物理场观测可反演地球内部运动的各种规律和物质分布特征。基于地震波走时和地球自由振荡观测得到的“真实地球模型”解算地球潮汐运动方程,可获得地球对日月等天体引潮力响应的理论值,最新的引潮位模型精度已达 10^{-11}m/s^2 量级。由武汉 SG 观测获得的实测重力固体潮主波振幅因子与理论模型间的偏差已优于 0.3%,仪器年漂移率在 $2\times 10^{-8}\text{m/s}^2$ 量级。

由于地球液核和核幔边界近似于椭球面,旋转地球将产生一个自转逆向简正模,导致液态地核的近周日自由摆动。孙和平等和徐建桥等采用武汉和国际 GGP 网络共 18 台 SG 观测资料,在有效消除海洋、大气和台站周围环境因素干扰的基础上,研究了液核的共振放大现象,解算了地球自由核章动共振参数,并由此用重力手段获得了真实地球液核动力学扁率要比流体静力平衡假设时获得的大约 5% 的重要结论。另外,孙和平等还构制了目前国际上最新的考虑液态地核共振效应的重力固体潮实测模型,被命名为孙-徐-D 实验模型,得到国际同行的高度关注。

2.3 海洋大气变化和重力场耦合

海洋和大气变化及其与重力场的耦合问题十分复杂,由于其潮汐变化部分与产生固体潮的力源均由日月等天体引潮力所致,人们无法用常规的数据处理技术将其从重力场中分离,只得借助于海洋和大气科学的知识建立专门模型,从而达到将干扰成分从重力观测中扣除。利用最新的由卫星测高技

术和有限元等方法构制的 11 个全球海潮模型以及武汉和国际 GGP 网络 SG 数据,孙和平等和周江存等成功地将海潮信号从重力观测中分离,检验了海潮模型的适定性问题。结果说明海潮负荷信号是重力残差中的主要成分,不同模型对 FCN 共振周期的影响在 1%—3% 量级。

基于标准大气定律和大气圆柱体分布模型,孙和平等引进了大气重力格林函数,用离散褶积方法求得了大气对重力场观测的影响,对台站高程、周围地形和地表温度变化等因素的影响问题进行了讨论。结果说明考虑大气质量负荷引起的弹性地球形变效应后,近区大气重力信号占全球总信号的 90% 以上。这一模型结果同 SG 实测结果相吻合。罗少聪等还研究了气压变化对武汉 SG 观测的影响。

2.4 地球固体内核平动振荡

精密测定地球内核的振荡参数将有助于正确认识地球液态外核和固态内核边界层精细结构和密度分布特征。地球固体内核的自由振荡又称平动振荡(或 Slichter 模),由赤道面正向、自转轴方向和赤道面逆向运动三部分组成。孙和平等和徐建桥等对 GGP 网络中的 SG 数据进行了综合分析,利用递积原理分析了重力频谱特征,探讨了一些可能与地球固态内核的平动振荡有关的重要微弱共振谱信号。当然,由于地核运动导致的地表重力信号微弱,固体内核的平动振荡检测至今还是一项非常困难的工作,这是国际上地球科学研究中的一个前沿性项目。另一方面,地球固态内核平动振荡的力学机制还不是很清楚,究竟是有深部大地震激发?还是由于地球液态外核的铁元素和高温导致的强电磁螺旋场,加上地球自转导致地核边界地形耦合力矩作用所致?还需要进一步的深入研究。

2.5 地球体的自由振荡

大地震激发的地球自由振荡存在环型和球型两种基本振型,这些简正模以弹性应力作为基本恢复力,周期一般不大于 1h,地球自转和扁率的影响可导致简正模的本振频率出现“分叉”现象。雷湘鄂等利用武汉和国际高频采样的 SG 资料,在国内首

次用重力手段成功检测到由 2001 年 6 月 23 日秘鲁 8.2 级大地震激发的全部球型自由振荡频谱,还发现了一些重要简振模频率分叉现象。将地震手段检测到的结果与理论模型比较,发现秘鲁地震激发的 ${}_0S_2$ 振型与阿拉斯加地震激发同一振型间的偏差达 1.5‰, 结合自由振荡谱线分裂理论推断出这种差别可能与地球内核的各向异性有关。通过 ${}_1S_2$ 振型的谱峰分裂现象研究了自转和逆转方向上的谱线分裂的非对称因子,目前正在试图对有关物理和力学机制进行解释。

2.6 地球自转和极移变化

地球自转变化包括极移和日长变化,极移重力效应表现为地球自转轴方向变化引起地表及内部各点经纬度变化,从而导致离心力位变化,其振幅集中在 Chandler 周期(约 435 天)和周年项两条谱线上。由于 SG 具有长期稳定特征,利用重力方法检测周期从几分钟到几年的地球自转和极移效应是区别于空间技术和国际地球自转服务合作(IERS)的又一独立重要手段。同时采用国际 SG 连续的重力观测和 IERS 提供的极移同步资料,徐建桥等和杨学峰等检测了极移导致的地表重力场变化。结果说明经过迭积处理后,由 SG 观测获得的极移重力信号与理论预测更接近,存在的一些差异可用台站背景噪音和局部效应来解释。

2.7 与绝对重力测量匹配研究地壳形变

中国科学院近年来利用 AG 承担了国家大型科学网络工程中绝对重力网的建设,由于 SG 可提供十分精确的短周期相对重力参考值,它可在网络建设中发挥重要作用。孙和平等利用 SG 和 AG 测量结果的综合对比,获得了精度在 0.2%量级的 SG 标定格值。经国家主管部门的批准,近年来中国科学院正在开展亚洲地区国际重力联测(2003—2006),利用中国科学院和日本京都大学的绝对和超导重力仪在日本(6 个台站)、中国(11 个台站)、印度尼西亚(4 个台站)、马来西亚(2 个台站)以及泰国、香港和台湾(1 个台站)等国家和地区开展国际重力联测和仪器间的相互比对,以获得与区域构造活动、环境变迁和地球动力学效应有关的重力变化。我们

还正在开展仪器飘移、地表长期形变和区域重力场长期变化特征研究,与国际同行合作将地表 SG 观测与由 CHAMP 重力卫星获得的结果进行比较,为空间技术提供有效的地表佐证。

3 发展我院重力场研究的思考

在我国大地测量、地球物理、地球动力学和相关学科的研究中,中国科学院在武汉和国际 GGP 网络中的 SG 观测是十分有效的可利用资源,尽管我们已经取得了一些成绩,但离准确描述地球动力学现象本质还差得很远。笔者认为中国科学院在今后的重力场研究中应加强卫星测高技术的应用,海陆重力场匹配技术和卫星重力场研究,以获得我国完整的区域重力场时变图像。同时建议在按照国家需求建立学术团队的基础上,注意重力场观测的几个联合,即:

(1)与空间测量技术的联合:目前卫星跟踪观测和甚长基线(VLBI)测量均需精细的地球形变模型,20 世纪 90 年代开始的空间测量计划(诸如卫星激光测距(SLR)和地球动力学激光测距系统(GLRS))的资料精度已达毫米量级,这要求我们尽可能地获得精确的地球动力学知识,包括液态地核的近周日共振效应等。

(2)与研究海平面变化联合:可靠而具有说服力的海平面变化需要集各种高精度手段。若要区别是由于冰后回弹或板块构造引起的高程变化,还是由于全球气候变暖引起的海平面变化,必须对全球网络中的各种观测手段,如 SG 和 AG 观测,精密位移测量(SLR,VLBI,GPS)和高精度验潮仪等进行综合。

(3)与研究地震过程和灾害联合:利用高频采样的 SG 观测,可成功地检测构造活动导致的地震信号以及由此激发的自由振荡。中国大陆地震活动频率之高,强度之大,居全球大陆的前列,是现今地球动力学最直接的体现。

(4)与低轨人造重力卫星(CHAMP、GRACE 和 GOCE)解算地表重力场模型联合:作为精度最高的 SG 和 AG 测量仪器,可为空间重力测量提供地表检验,从而获得精密重力场模型,为高精度大地水准

面的确定、全球密度模型、地球内部热流、固体和液体质量之间的再分布、冰后期反弹产生的慢形变、动态地壳均衡、陆地岩石圈、地震灾害、海平面变化、海洋环流、GPS 水准和卫星轨道定轨等提供有效约束。

主要参考文献

- 1 Crossley D, Hinderer J, Casula G *et al.* Network of superconducting gravimeters benefits a number of disciplines. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 1999, 80(11), 121: 125-126.
- 2 Smylie D E. Viscosity near Earth's solid inner core. *Science*, 1999, 284: 461-463.
- 3 Sun H P, Hsu H T, Jentzsch G *et al.* Tidal gravity

observations obtained with superconducting gravimeter and its application to geodynamics at Wuhan/China. *J. Geodynamics*, 2002, 33(1-2): 187-198.

- 4 雷湘鄂, 许厚泽, 孙和平. 利用武汉 SG 检测地球自由振荡. *科学通报*, 2002, 47(18): 1 432-1 436.
- 5 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.
- 6 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, 31(9): 719-726.
- 7 许厚泽, 孙和平, 徐建桥等. 武汉国际重力潮汐基准研究. *中国科学(D 辑)*, 2000, 30(5): 549-553.

Temporal Variation of Gravity Field and Geodynamics

Sun Heping

(Key Laboratory of Dynamical Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077)

It is one of the hot international frontier research subjects in Earth science domain to study geodynamical problems by using modern high precision gravity field information. Except for seismology measurements, the gravity can provide us with one effective tool to know accurately and recognize deeply the structures of the Earth's deep interior. The background and action of the gravity studies using superconducting gravimeters are simply summarized in the paper. The present status and tendency of the international developments as well as the main research achievements obtained under the support of the key knowledge innovation project of the Chinese Academy of Sciences are introduced. Finally, several reference suggestions for how to better use of the gravity information in geodynamics and national requirements are proposed.

Keywords Gravity field, Geodynamics, Present status, Tendency

孙和平 测量与地球物理研究所副所长, 研究员, 博士生导师。1955 年出生于江苏江阴。1980 年毕业于中国科学技术大学, 1980—1991 年在中国地震局地震研究所工作, 1991—1996 年在比利时留学, 1995 年获比利时鲁汶大学博士学位, 1996 年回国到中国科学院工作至今, 国家杰出青年基金和中国科学院“百人计划”入选者。现任中国地球物理学会理事, 国家重力场与固体潮研究协调组副组长, 中国科学院知识创新工程重要方向性项目负责人, 中国-比利时政府科技合作项目中方首席科学家, 国际 *J. Geodesy* 期刊编委, 主要从事与地球动力学问题有关的地球重力场理论、资料分析等研究。