

自然科学学科发展战略研究报告之十六——大地测量学

Strategic Research on Natural Science Disciplines: Geodesy

国家自然科学基金委员会

一、发展大地测量学的战略意义

大地测量学是为人类的活动提供地球空间信息的科学。获取地球空间信息,合理利用空间资源,已成为现代社会经济发展战略的重要环节。现代大地测量将扩大在经济和社会发展中的作用,全球定位系统(GPS)定位技术将广泛用于交通工具的自动导航和引导、海洋资源开发、快速自动和半自动测图,以及大型精密工程规划、设计和放样。

大地测量技术将在防灾减灾和救援活动中发挥日益增强的作用,为地震灾害的预测提供大地测量监测信息,监测预报滑坡和泥石流;为预测厄尔尼诺现象提供信息。利用GPS定位技术结合卫星通讯建立灾难事件救援系统。

大地测量技术正在环境监测、评价和保护等领域发挥作用,监测极地冰盖和海平面的变化;对全球环境监测系统提供大地测量信息,给出环境破坏全球分布的评估。

现代大地测量将为研究地球科学面临的重大问题提供更丰富、更准确的信息,并加强其在地球科学中的基础性地位。

大地测量将为发展空间技术和国防现代化建设提供重要保障,包括提供精密地心参考框架和全球重力场模型;机动兵器的实时定位和一切军事行动所需要的位置和方向信息。

二、大地测量学的发展趋势

1. 向地球科学基础性研究领域深入发展

经典地面大地测量定位平均极限精度为 10^{-5} ~ 10^{-6} ,一般不能分辨地球的动态变化,只能以刚性均匀旋转地球假设为前提。定位的静态性、相对性、局部性限制了经典大地测量深入地球科学扩展其学科科学目标的能力。

现代科学技术的成就导致大地测量出现重大突破:空间大地测量精度比经典大地测量提高了2~3个量级,从根本上突破了经典大地测量的时空局限性。技术的突破导致学科经历一次跨时代的革命性转变,进入以空间大地测量为标志的现代大地测量学科发展新阶段。

空间大地测量技术给大地测量学科带来了巨大冲击和新的前景:除水准测量外,传统的地面测量定位技术将被空间定位技术取代,高精度廉价微型卫星定位仪的出现使获取地理位置信息可以像今天获取时间信息一样快速和足够精确;地形测图将不需要预先测设大地控制点,将出现本身包含实时三维定位的测图系统;国家大地网将主要用于监测地壳运动;现代大地测量将为探索地球深部结构和动力学过程提供多种类信息。

现代大地测量将扩大其直接服务于社会经济活动的应用面,但总的趋势是向地球科学的深层次发展,推动学科发展的主动力将是其在相关地质领域的科学目的。大地测量学的学科性质将从工程应用为主转向地球科学的基础性学科。现代大地测量与地球科学多个分枝互相交叉渗透,将成为推动地球科学发展的前沿学科之一。

现代大地测量的基本任务是:建立和维持高精度的惯性和地固参考系,建立和维持地区性和全球的三维大地网,包括海底大地网,以一定的时间尺度长期监测这些网随时间的变化,为大地测量定位和研究地球动力学现象提供一个高精度的地球参考框架和地面基准点网;监测和解释各种地球动力学现象;测定地球形状和地球外部重力场精细结构及其随时间的变化,对观测结果进行地球物理学解释。

2. 空间大地测量将主导学科未来的发展

空间大地测量是实现大地测量学科各类目标最基本最适用的技术手段,是大地测量学科向地球科学深层次扩展的主通道和主推力,决定着学科的发展方向 and 科学地位。

近 10 年空间大地测量发展的特点是:GPS 技术已迅速普及,正在成为大地测量主要常规技术;技术模式的多样化,包括空基系统,陆基系统和卫星跟踪卫星系统等,正在逐步形成一个全功能的配套系统;向降低用户人工干预程度,作业自动化方向发展;追求更高的精度、分辨率和可靠性,继续系统的更新换代过程;今后 10 年将实施一系列国际空间大地测量计划,以支持精化全球参考框架和研究地球动力学问题。

3. 全球定位系统、卫星激光测距和甚长基线干涉测量法将是扩展学科应用和实现其科学任务的主要技术

GPS 水平定位精度在目前最佳技术条件下可达 10^{-8} ,垂直分量精度为 3 厘米;到本世纪末 GPS 定位精度可望达到 1~3 毫米。

GPS 定位大部分误差影响已能控制在厘米级或亚厘米级水平。GPS 定位参考系的误差是一个应予全面研究的基本问题,解决这个问题的普遍趋势是建立用户独立的 GPS 定轨跟踪网,自我提供精密星历服务。定轨网的全球框架跟踪网形式优于区域性基准网形式,前者是一个国际合作 GPS 网。GPS 定位技术应用于大地测量最深远的影响将是籍助这一技术实现学科的科学目标,深入地球科学。GPS 已用于各种形式的地壳运动和地壳形变的连续监测,用于海平面变化的监测,星载 GPS 接收机精密定轨将改善各种卫星重力技术的精度,实验研究已证实 GPS 可用于地球自转的监测。GPS 类型的定位技术是一种近于全能型的大地测量技术,将成为未来几十年大地测量实现其全部目标的主要和普遍使用的技术手段。

卫星激光测距(SLR)是目前精度最高的绝对(地心)定位技术,在定义全球地心参考系中起决定性作用;是卫星重力技术确定全球重力场低阶($n < 50$)模型的主要工具,一种几乎适合于大地测量所有目标的全能型技术;是建立大地测量参考框架以及研究地球动力学问题的基本技术手段。目前精度已达 1 厘米水平,预测今后 10~15 年还会有突破性进展:一是由于硬件技术的发展,精度将达到 1 毫米级水平;二是地基系统发展为空基系统,将激光测距仪安置在卫星上对地面反射靶测距;三是将出现卫星激光测高系统,以低廉的代价获得高精度(分米级)高分辨率(水平距离 100 米左右)的全球时间调制(DTM)。空基 SLR 的出现将成为监测全球地壳运动和区域性地壳形变又一理想手段。

甚长基线干涉测量法(VLBI)仍然是测定长基线最精密的技术,精度为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$,也是目前监测地球自转运动变化的主要手段。极移测定精度为 0.001 弧秒,日长变化的测定精度为 0.05 毫时秒。VLBI 在基本技术性能方面还看不到会有大的进展,

可能在相当长时间内大致保持目前的状态。

4. 重力场研究将致力于发展卫星和近地重力探测技术恢复高分辨率重力场

近 20 年来地球重力场研究取得了突破性的重要进展:开创了卫星重力技术时代;出现了微伽(10^{-8} 米/秒²)级精度的绝对重力仪和相对重力仪;引入了重力场统计理论并发展了相应的数值方法,为重力场测定的数值分析和综合利用多种重力相关观测量求解重力场提供了新的有效方法;引入了重力场的谱分析方法和相应的快速算法,在很大程度上缓解了现代重力场求解面临的繁重计算。

重力场研究未来的发展有:

(1)重力场研究在大地测量学中的作用和地位发生了重大变化,在以基础地学研究为主的现代大地测量的整体框架中,物理大地测量和空间大地测量紧密结合组成学科的支柱,共同处于支配学科发展的地位,确定重力场结构的精细程度将是未来大地测量学科发展的主要标志之一。

(2)重力测量技术的发展将致力于分辨重力场短波频谱和监测重力场时变量。今后 10~20 年,包括低轨飞行器在内的卫星重力技术的发展将实现准确度 1~2 毫伽(10^{-5} 米/秒²)、分辨率为 50 公里的全球重力场。最新的第五代绝对重力仪准确度可达 $\pm 1 \sim 2$ 微伽,超导(相对)重力仪精度已达 0.1 微伽,航空重力测量和惯性重力测量精度大致为 $\pm 1 \sim \pm 6$ 毫伽,是分辨小于 50 公里短波重力场的有效技术。由于重力测量技术的发展,已有可能监测重力场时变量,为研究地球动力学提供新的重要信息,测定时变重力场的问题将受到更大重视。

(3)现代重力测量技术的进展将有力推动重力场的基础理论研究。重力场的解析理论主要进展是莫洛金斯基(Molodensky)问题解的适定性问题取得了某些数学上的精确结果;导出了严格线性化形式;提出了多种新的解算方法;重力场的统计理论建立了牢固的数学基础。

面对多种类重力场数据的出现,将进一步推动相应的理论研究,已经呈现的研究方向主要有:非经典(纯量)莫洛金斯基问题,边值问题的非线性理论、非线性解和二次项逼近理论,测高一重力混合边值问题,重力梯度边值问题,超定边值问题、解析法和统计法的结合,内部和外部边值问题统一表示理论和重力反问题,时空(动力学)边值问题。近年来在这些研究方向上已取得一定进展,未来 10 年超定边值问题、重力反问题和时空边值问题将受到更多的注意。

(4)全球重力场模型将向联合多种数据提高准确度的方向发展。全球重力场模型的进展主要有:低阶次位模型($n \leq 50$)已经达到了很高的准确度,使卫星定轨精度达到了分米级,全球位模型大地水

准面的精度提高到亚米级水平;理论模型有了重要改进,已从以斯托克斯(Stokes)理论为基础过渡到以莫洛金斯基理论为基础,顾及了厘米级影响的一系列改正项;地球表面重力数据有了极大的改善,由卫星雷达测高(SRA)技术获得的重力数据填补了全球海洋重力测量的空白;由于引入了快速傅里叶变换(FFT)算法大大提高了求解位系数的计算速度。

预计 90 年代将推出更多更精密的高阶位模型;模型 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 平均重力异常精度有可能达到 $\pm 3 \sim \pm 5$ 毫伽, $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 平均大地水准面精度达 ± 5 厘米左右。研究方向可能集中于:继续理论研究,测高一重力混合边值问题将是一个重要研究课题,致力于构造适于应用下一代多种类观测数据的新边值问题;研究利用区域性高密度观测数据改善已有高阶模型位系数,提高模型用于本区域的精度;继续研究更有效的联合求解算法;可靠地检验评价位模型准确度的理论和方法将作更深入研究。

(5) 局部重力场逼近将致力于恢复高精度高分辨率重力场。主要进展有:莫洛金斯基截断理论有了很大发展;比亚哈马(Bjerhammar)理论得到了进一步发展;最小二乘配置法是局部重力场逼近最重要和影响面最广的一项进展;发展了多种组合型逼近方法;快速傅里叶(Fourier)变换法(FFT)在局部重力场逼近中得到了普遍应用。局部重力场逼近发展趋势:一是局部重力场的研究将向确定分米级和厘米级精度和更高分辨率(如 $1 \sim 5$ 公里)大地水准面的方向努力;二是研究地形复杂的山区恢复重力场短波分量的有效方法;三是综合利用多种重力场信息,联合求解局部重力场,在超定边值问题的框架中寻求最佳解法;四是大地测量边值问题用于局部重力场的理论将向严密化方向深入发展。

5. 大地测量学的发展仍有待新技术和理论的突破

(1) 对大地测量发展的要求 地球动力学的研究要求大地测量监测地壳运动和形变应具有分辨 1 毫米/年变化的能力,重力场的测定精度要求达到 $1 \sim 3$ 毫伽、30 公里的分辨率,目前大地测量的技术水平还满足不了这一要求。因此要求监测地壳运动和区域地壳形变的精度和采样率要有较大改进。测定那些端点位于稳定板块内部的跨板块基线相对速率切向分量其分辨率必须达到 1 毫米/年的精度。如果测定地块之间速率能达到 ± 5 毫米/年,就可以对跨大陆板块边界带的整体形变提供有用的地质学约束。跨越强构造活动带地区的空间大地测量系统,应具有厘米到毫米级精度,能按每小时到每周定期复测的高采样率,应特别重视保持测量标石埋设的长期稳定。重力数据在研究岩石圈动力学中的精度与分辨率要求很高,一般要求短波有几毫

伽精度,长波有更高的精度。研究海洋环境要求几毫伽精度,分辨率好于 50 公里。目前还没有一种重力计划能满足所有的要求,特别是进行 $1 \sim 10$ 年周期的全球重力变化的监测。更精密的 SRA(如 TOPEX/POSEIDON,ERS)可能是满足大部分要求的最好方法,由于不能准确模拟海潮、波浪和洋流等海洋动力学影响,SRA 恢复重力场的精度和分辨率可能最终将限制在几分米和 50 公里,这样的数据不可能解决海陆转变消减带的任何问题。许多海洋问题要求测深和已知高精度重力值,完成这样的全球海洋勘测还很困难。低轨高精度空间重力计划(如卫星重力梯度计划)是研究大陆大地构造、地幔对流不受政治边界限制的唯一可行技术。地球自转轴位置(极移)和转速(日长)监测的主要问题有:由于没有准确的大气模型,VLBI 受大气影响产生的约 1 厘米垂向误差近期难以改善;分析自转参数变化的动力学效应需要更精密的全球板块运动模型,目前的模型还不能满足要求;完善的监测需要建立一个良好的全球 VLBI 和 SLR 监测网,目前的密度和图形与最优网比较还需要改进。

这些问题应在大地测量和地球物理学学科交叉发展和合作中解决。要全面满足地球动力学对大地测量监测的要求,现代大地测量技术仍需要有新的突破,需要高技术的支持。精密高程测量是目前大地测量技术的薄弱环节,空间大地测量测定高程的能力需要从目前的几厘米水平提高到毫米水平,要在克服大气折射误差方面有突破;水平定位精度要从 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ (厘米水平)提高到 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ (毫米水平),卫星定轨精度从分米级提高到厘米级;卫星重力技术要从目前 $5 \sim 10$ 毫伽水平提高到 $1 \sim 3$ 毫伽水平;分辨率从 100 公里提高到 50 公里或更好。机载重力测量要从目前的 $3 \sim 10$ 毫伽提高到 $1 \sim 5$ 毫伽或更好;要发展廉价的无人自动连续监测卫星定位仪,能自动编辑和传输数据;提高 GPS 监测地球自转参数的能力;发展快速精密海底定位和重力测量系统。

(2) 大地测量学学科发展面临的重大问题

基础技术问题:一是在技术上如何实现建立具有 10^{-9} 准确度和稳定度的全球大地测量参考框架的问题;二是关于发展抗环境干扰和能精密模拟环境影响的定位技术和新硬件,重点研究近地和对流层大气折射问题;三是发展快速高效精密水准测量,寻求取代精密水准测量的新原理、新技术,研究直接测定重力位差的原理和技术;四是关于以厘米级精度水平统一世界高程基准问题,研究精密确定跨海洋洲际重力位差的理论和方法。

基础理论问题:一是地球引力场理论,关于确定厘米级精度、优于 50 公里分辨率大地水准面的理论和方法;以实际地球表面作边界面的重力测量

边值问题解的存在性和唯一性;非线性固定边值问题和非经典边值问题(超定边值问题、卫星重力梯度边值问题和重力一测高边值问题)的理论和解法;关于内部边值和外部边值问题的统一表示理论;重力场的微分结构。二是大地测量参考框架理论,建立具有 10^{-9} 精度的大地测量参考框架应考虑哪些误差影响;以 10^{-9} 精度确定各种地球动力学因素对地球定向的影响。三是相对论大地测量、相对论框架中的惯性中心系统(CIS)理论,空间观测的后牛顿归算问题;相对论框架中建立地球中心系统(CTS)的理论和方法;相对论水准实现问题;地球自转轴运动的广义相对论效应;运动系统中重力和惯性力的分离问题。四是大地测量观测数据的地球物理解释理论,求解和给定的重力异常相关的地球密度异常,各种形式地壳构造运动的重力场效应的理论模型;重力与高程观测最佳联合处理模型;重力场动力学反演问题,如何利用重力数据结合地震三维层析成像揭示地幔对流空间模式的细节;根据几年至几十年大地测量板块运动监测数据,结合地质学的板块运动模型研究板块运动和地幔对流的时间相关性;地下水及其变化,大的土方工程(如三峡水库)等环境变化对形变和重力场监测的影响。五是大地测量数据处理理论,观测粗差检测理论以及抗粗差估计理论;多种类观测动态平差理论;四维整体大地测量时变协方差函数的研究。

三、我国大地测量学发展的战略目标与优先发展领域

大地测量学科正处于技术革命的历史转变过程。在总体发展水平上,我国与当代先进水平的距离大约10~15年,到下一个世纪10~20年代我国可能具备独立发展精密测地卫星系统的综合国力。我国目前和今后几十年仍将是一个人口众多的发展中国家,资源不足,交通不畅,发展资金短缺,又是世界上自然灾害多发国之一,这些问题在相当长

的时期内仍将是我国发展经济优先考虑的问题,作出这样的估计是我们考虑大地测量发展战略的基本依据。

1. 战略目标

为我国地球科学和社会发展提供完善和深层大地测量支持是我国大地测量发展的战略方向;建立以空间大地测量为主体的现代大地测量完整体系,满足地球科学、空间技术和社会经济发展的要求是我国大地测量发展的战略目标。

(1)面向和深入地球科学,即:为解决地球科学问题提供相关大地测量信息;制订科学的大地测量监测计划,研究最佳观测方案;以大地测量特有的理论和方法,对观测数据作地学解释或反演。

(2)从静态大地测量体系转到动态大地测量体系;制订长期监测计划,修订大地测量法式和规范,建立完善的大地测量监测系统,发展四维大地测量理论和方法。

(3)完善和精化我国大地测量基准体系。

(4)精化我国领域重力场,发展对我国重力场最佳拟合的全球重力场模型。

(5)发展以应用GPS技术为主的区域性动力大地测量。

(6)拓宽大地测量为我国社会、经济发展的服务领域。

2. 优先发展领域

根据对我国大地测量发展战略目标及重点的设想,结合我国大地测量发展的现状及基本国情,需要优先考虑那些具有重大战略意义,紧迫,经过努力又可能实现的项目,着眼于加速发展进程,尽快缩短与世界先进水平的差距。其中包括:我国及邻区岩石圈运动学模型的建立,地球动态变化信息及地固参考系研究,大地测量观测数据的地学解释和反演,重力位场精化及反演理论和方法,空间大地测量研究,大地测量信息系统,以及在相对论力学框架中的大地测量学理论体系。

(责任编辑 刘先曙)

(上接第20页)

极度贫瘠、土壤的重度污染,等等,所以逆向演替大多需以第二类方式为主。恢复生态学方法的主要理论意义就是说明如何实现这一逆向演替过程。对极端条件下受迫生态系统逆向演替(恢复)的认识,将从另一个侧面丰富极端条件下生态学的内容。对人工支持的诱导过程的研究,将赋予生态学以新的多学科性质,并使人类在人与自然关系中由依从的奴仆和盲目的主人变为主动积极的合作者。并且,可以预言,在目前高度关注全球环境变化和生物多样性保护的情况下,恢复生态学仍将高速地发展。其可能方向之一是大尺度的生态工程。它不仅是惯常

所指的水资源保护和植被保护等生态措施,还包括象局域气候改造这样的生态工程——这需要将生态措施与工程措施的创造性结合。生态学还可能会以分子生物技术和遗传工程技术为手段,对濒临灭绝的物种进行保护和对已灭绝的同源物种进行复制。进而言之,如果再与宏观的景观恢复相结合,那么全球生物多样性的就地保护和异地保护将具有更为丰富的内容。随着分子生物学和生态学的发展,如果生物进化方向上不存在不可逆性,谁又能完全排除会出现象科幻电影《侏罗纪公园》中出现的那种古生态的奇迹呢? (责任编辑 王宏章)