

文章编号:1671-8860(2007)11-0980-08

文献标志码:A

# 我国现代高程测定关键技术若干问题的研究及进展

李建成<sup>1,2</sup>

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

**摘要:**阐述了大地水准面在大地测量学及相关地球科学中的科学意义、作用及其应用,提出了利用 GPS 技术结合高精度似大地水准面代替我国高程测定的思路,分析了目前地球重力场长波、中波和短波在计算 cm 级大地水准面中具备的条件,论述了确定 1 cm 精度城市和 5 cm 省级似大地水准面的若干关键技术问题及其必要性和可行性,提出了我国 cm 级大地水准面确定中需解决的主要理论问题和若干关键技术,评述了我国局部大地水准面的主要进展和取得的成果。

**关键词:**地球重力场;大地水准面;高程测定

**中图法分类号:**P223.0; P224

测绘技术进步的拓展在于节省人类的体力,最大程度减少劳动强度和野外工作,并且使成果的获取更加迅捷、更加精准。航空航天测绘和定位技术完成了人类自然体力无法完成的工作。在大地测量学科领域, GPS 技术的普及使该学科进入了卫星定位时代,实现了高精度、高效率三维几何定位,但其中相对于参考椭球面的几何高程(大地高)分量与地球重力场没有直接关系,两点间的几何高差不反映重力位差,不能直接用于描述地形变化,在绘制地形图时,需要将几何高转换为相对于大地水准面(重力等位面)的海拔高程(正高),即一点的海拔高等于其几何高减去该点所对应的大地水准面高,大地水准面模型就是用其相对于参考椭球面的几何位置表达的。利用目前拥有的 dm 级精度大地水准面模型,可直接由 GPS 测定地面点具有相应精度的海拔高,高于 dm 级精度要求的海拔高程测量目前还必须采用高投入、低效率的水准测量技术。这一高程测量问题长期以来成为真正实现三维卫星定位的瓶颈,cm 级精度大地水准面的实现标志着这一瓶颈的突破,将其定为 21 世纪大地测量学科发展的首要目标<sup>[1]</sup>。

大地测量学是研究地球及行星的几何和物理

形态特征及其变化规律的基础科学。物理大地测量学的主要任务是研究地球形状及其外部重力场;空间大地测量和物理大地测量的结合开创了现代大地测量发展的新阶段,使大地测量有能力深入地球科学,在更深层次上参与解决地球科学面临的重大科学问题。

确定精细地球重力场在地球科学中有重要意义。地球重力场结构由地球物质分布结构所决定,重力场信息反映地球内部的密度分布信息。重力异常即实际重力场与处于流体静力平衡理想地球体的正常重力场之差,能够揭示地球内部物质分布的非平衡状态,对应地球内部的密度异常,是地球内部动力学过程的动因。测定重力异常是目前探索地球内部结构的三种手段(包括地震波传播分析以及地磁场测定)之一。通过重力异常可反演密度异常,但这一反演问题不适用。目前,地震波层析成像可提供地震波速度异常的三维图像,但直接由波速异常转换为密度异常还很困难。联合重力异常和三维地震层析成像,结合地球表面的形变和位移信息(由大地测量获得)以及对地幔物质物理化学性质的实验研究,加之地壳及岩石圈的磁异常信息,可以加深对地球内部密度异常结构及其动力过程的了解和认识。

确定高精度大地水准面对研究海洋动力环境和海洋地球物理问题有重要意义。目前,利用卫星雷达测高技术可精密测定平均海面,由于受各种非保守力的作用,使海水处于运动状态,平均海面并非重力等位面,其相对于大地水准面的起伏为稳态海面地形,决定全球大洋环流,产生海水热能的传递和物质的迁运,与大气互相作用影响全球气候变化,厄尔尼诺和拉尼娜现象就是其中一种灾害性气候变化,这两种现象都会引起平均海面高的异常变化。海洋大地水准面也是反映海底地形起伏及海底大地构造的物理面,洋中脊、海沟、海山和海底断裂带都可经过频谱分析从海洋大地水准面起伏图像中进行识别,为海洋地球物理研究和矿产资源勘探提供基础信息。准确测定海面动力地形和描述海洋环流,研究海底构造,以至于监测人类关注的海平面变化及南极和格陵兰冰层的变化和运动,都对确定高精度高分辨率大地水准面有很高的要求,新一代卫星重力探测计划对满足这一要求起决定性作用。

确定具有 cm 级精度大地水准面将是大地测量学发展新的里程碑。目前,大地水准面的精度在中、长波段大致还处于 m 级或 dm 级水平,而中、长波在地球重力场谱结构中绝对占优,大于 95%。提高中、长波分量的准确度是进一步精化地球重力场和大地水准面的关键,新的卫星重力探测计划是解决这一问题的最有效途径,可以低成本、高效率地提供高精度的分辨率为 50~100 km 全球分布的重力数据。如果实现 cm 级精度(似)大地水准面,就可将由 GPS 测定的椭球高(大地高)直接转换为正高(正常高),并达到 cm 级精度,在实用上可部分替代水准测量,这将是大地测量学解决正高或正常高测定难点的重大进展。

全球导航定位系统(GNSS)使导航和定位发生了一次深刻的革命,并对地球空间信息的发展产生了深远影响。利用 GPS 获得的高精度三维椭球坐标联合 1 cm 精度(似)大地水准面可得到精确的正常高或海拔高程,可使高程测量实现革命性转变。本文提出了实现 1 cm 精度大地水准面需要解决的理论问题和关键技术。

## 1 大地水准面在大地测量学及相关地球科学中的作用及其意义

大地水准面在大地测量中的应用除了建立大地测量坐标系、确定参考椭球参数及其在地球体内的定位定向外,在现代卫星大地测量定位中还

将起到另一种重要的基准作用,即高分辨率、高精度的大地水准面数值模型给出任一地面点相应的(似)大地水准面高,可以看作一种测定正常高或正高的参考框架。水准测量的参考基准只是(似)大地水准面上一个特定的点(一个验潮站确定的平均海面),其他所有地面点的正常高或正高都要从这一点出发通过水准测量传递。而(似)大地水准面模型提供了覆盖大陆地区实际可用的高程参考面,由此通过 GPS 大地高测量结合(似)大地水准面数值模型可确定地面点的正常高或正高。未来高分辨率 cm 级精度或更优的(似)大地水准面模型为用 GPS 精密测定地面点正常高或正高展现了巨大的潜力和良好的前景。精密(似)大地水准面的确定使未来海拔高程的测量将以 GPS 测高为主,辅以少量水准测量,后者将起到高一级控制或检核作用,而现有的国家水准网基本上可满足这一高程测量模式的需要。这预示着除某些工程测量必需的高精度水准测量外,繁重的水准测量在测绘作业中将降低其作用,而逐步为 GPS 水准测高所代替。CQG2000 似大地水准面的确定充分利用了现有国家高精度 GPS 水准网,即 GPS 水准和较丰富的全国重力资料,因此,其结果有可能成为用于较低精度的 GPS 水准测量的新一代似大地水准面模型,在测绘生产中将会得到较广泛的应用。这将为我国转变高程测量技术模式打下初步基础,并可望产生显著的经济效益<sup>[2]</sup>。

大地水准面将是统一全球高程基准最适宜的参考面。由于高程基准不同,国与国之间的地形图或地面 DTM 将出现拼接差,世界屋脊珠峰的高程就会有多值性,我国公布的精确珠峰高程是以中国黄海平均海面起算的,而用印度洋或其他的海域平均海面起算,高程可能差到 1~2 m。经济全球化趋势必然要求包括地理信息在内的广泛的信息资源共享机制,这一趋势的发展在有一个长期稳定的国际和平环境的条件下,将推动数字地球从概念走向实现,并进入世界网络社会。随着未来(可能需要 10~20 a)建立全球高分辨率、高精度 cm 级大地水准面目标的实现,统一全球高程基准的问题将进入国际议事日程。中、长波(低于 100 km 分辨率的波段)cm 级精度大地水准面可望通过新一代卫星重力计划 CHAMP、GRACE 和 GOCE 实现,而高于 100 km 分辨率的 cm 级大地水准面必须由各国家和地区利用地面或航空重力测量结合更密集的 GPS 水准来实现,这将是一个较长期的任务。CQG2000 似大地水准面沿着这一发展方向跨进了一步,基本上实

现了中波( $100\sim500$  km)和部分地区短波( $50\sim100$  km)dm 级精度大地水准面的目标,从长远看,为将来加入统一的全球高程基准创造了条件。WGS84 在某种意义上说实现了全球几何定位基准的统一,而与地球重力位相联系的垂向定位基准的统一只有当一个全波段 cm 级精度全球大地水准面模型产生后才有可能,这是世界各国大地测量学界共同努力的目标。

测定和研究地球重力场,包括确定大地水准面更重要的意义还在于为相关地球学科(如地球物理学、大地构造学、地球动力学、地震学和海洋学)研究地球内部结构和动力学过程提供基础信息。重力场结构是地球质体密度分布的直接映象,重力测量数据是研究岩石圈及其深部构造和动力学的一种“样本”,精细的重力异常分布和大地水准面起伏对于弄清当前岩石圈和地幔动力学研究中的一系列问题有很重要的作用。大地水准面起伏的中、短波部分与岩石圈内部负荷及地形有很强的相关性;用卫星测高数据确定的高分辨率全球海洋大地水准面研究海底及其深部构造取得了瞩目的成果,发现滤去长波分量的海洋大地水准面起伏与海底地形起伏有很好的相似性。海山、海沟、海岭(洋脊)和断层等海底地形和构造单元在海洋大地水准面起伏图像上清晰可辨,由此发现了许多过去未知的海底大山和海底断层等。重力数据和大地水准面起伏还用于研究岩石圈的热演化模型、弹性厚度以及小尺度地幔对流等动力学问题。利用重力数据研究地球内部结构和动力学问题相当广泛,但已有研究表明,这些研究一般要求数据分辨率优于 50 km,重力异常应有 mGal 量级的精度,相应于短波大地水准面有 cm 级精度,长波则要求重力异常有更高的精度,要达到这些要求还要作较长期的努力。

卫星测高已经可以提供近于 cm 级精度的平均海面高,如果已知相应精度的海洋大地水准面,则可分离出海面地形,并导出全球洋流模型。海洋大地水准面有助于研究海洋动力学问题,但要从平均海面高严格分离出海面地形和海洋大地水准面,目前还未取得大的进展,需要进一步探索。

## 2 1 cm 精度(似)大地水准面确定的主要理论问题和关键技术

### 2.1 卫星重力计划为高精度局部大地水准面的确定提供高精度长波重力场信息

卫星重力探测技术几乎与人造卫星技术同时

出现于 20 世纪 50 年代末、60 年代初,最早采用天文光学经纬仪摄影交会的方法跟踪测量卫星的轨道摄动,70 年代开始发展起来的地面站对卫星的激光测距(SLR)跟踪很快取代了普通光学观测,由轨道摄动观测量反算扰动重力场参数,建立了早期低阶( $<24$  阶)全球重力场模型系列,满足了当时人造卫星定轨和建立全球地心大地坐标系的迫切需求,这一时期的卫星重力模型用于确定全球大地水准面的精度为 m 级水平,称其为第一代卫星重力技术。

70 年代末开始出现卫星对海面的雷达测高技术,发展到今天,测高精度由最初的 m 级提高到 cm 级,将平均海面近似看成大地水准面,由此确定海洋重力场,分辨率可高达  $5\sim10$  km;同时,SLR 的测距精度也达到了 cm 级,这一时期(到 20 世纪末)联合 SLR、卫星测高和地面重力数据,先后建立了 180 阶和 360 阶(相当于 50 km 分辨率)高阶重力场模型系列,其中公认精度最高的模型是 EGM96,相应大地水准面的精度为 dm 级或亚 m 级,重力异常的精度为几 mGal 量级。高精度 SLR 和卫星测高形成的卫星重力技术不妨称其为第二代技术。由于这一代技术本身固有的局限性,已接近其精度潜力的极限。这一代重力技术提供的重力场模型已在多个涉及静态重力场信息需求的相关地学领域得到相当广泛的应用,特别是在物理海洋学和海洋地球物理学领域。由于卫星测高提供了高分辨率 cm 级精度平均海面,约  $1\sim2$  dm 级精度的海洋大地水准面和  $2\sim3$  mGal 精度的海洋重力异常,由此可确定具有相应精度的全球海洋海面地形和对应的大尺度海洋环流系统以及中尺度海洋动力现象(涡),这是海洋现场观测技术很难获得的结果。利用此精度的海洋重力场信息不仅为海洋板块边界划分提供了独立于其他地球物理方法的解释,而且新发现了不少海底岩石圈构造(如断层)和海底地形构造(如海山),还用海洋重力数据反演绘制了据称分辨率可达 10 km 的海底地形图。尽管如此,第二代卫星重力技术所能提供的全球重力场参数,以 EGM96 模型为例,其中中、长波频段( $500\sim4\,000$  km)全球平均精度约为  $0.5\sim10.0$  cm<sup>[13]</sup>。这表明这一代卫星重力技术不可能分辨时间尺度在 5 a 以下的全球重力变化。这一时间分辨率和精度水平上的局限性不仅不能满足相关学科对静态地球物理问题作重力效应解释的需求,更难以甚至不可能满足对地球动力学全球变化作重力场响应分析的需求。

新一代卫星重力技术则突破了第二代技术的局限性,这是由于它实现了全新的重力探测模式。其特点之一是其测量信号不经过大气对流层,卫星处于大气层的暖层(F 层)与散逸层(G 层)之间,那里的大气密度只有海平面的百亿分之一,信号传播几乎不存在大气延迟误差的影响;特点之二是其卫星轨道都是偏心率很小的近极近圆轨道,轨道构成几乎包围整个地球的交叉(菱形)格网,可实现全弧段的连续高采样率的 SST 跟踪测量或 SGG 逐点测量,这是与少数地面站 SLR 跟踪卫星短弧轨道的最大区别,也是其获得高精度的最大优势。不仅恢复静态中、长波( $>500$  km)重力场的期望精度可达到 cm 级或更优,而且其中 GRACE 卫星 LL-SST 测量可分辨 10 d 时间尺度的长波时变重力场,测定大地水准面年变化的精度为 0.01 mm/a, GOCE 任务恢复全球重力场的分辨率约为 100 km,期望精度为 1 cm。新一代卫星重力测量精度水平比前一代提高了 1~2 个量级,尤其是具备了测定高时间分辨率(10~30 d)时变重力场的能力,是地球重力场测量跨时代的重大进展。这一进展将对相关地球学科的发展产生深远影响,对推动相关学科的交叉研究带来范围广泛的“冲击”效应和机遇,也将是大地测量学科发展继 GPS 之后的又一次有革命意义的新跨越,特别是将推动物理大地测量学基础理论体系的扩展,并进一步增强其参与和支持解决当今地球科学面临的重大问题的能力。

新一代卫星重力测量任务的实施为实现这一目标展示了十分乐观的前景,由于确定大地水准面的理论和方法目前仍然限制于经典的 Stokes 理论框架,且该理论本身存在固有缺陷,即假定大地水准面外部不存在质量,但实际上陆地山区海拔高程可达数 km,除非有精确的地形密度分布资料作所谓间接影响改正,才有可能在此框架下实现确定 cm 级精度大地水准面,但目前还没有地壳密度的详细知识。近 5 a 来,在 cm 级精度概念下,已有学者研究密度参数偏差对确定大地水准面的影响,都涉及到包括 Molodensky 理论在内的经典基础理论的局限性。对于利用各类卫星重力数据和航空重力数据确定地球重力场和大地水准面,甚至包括经典的重力归算,都要处理重力数据向下解析延拓的问题,目前普遍采用的 Poisson 球面积分下延算子或其他下延方法都存在欠适定(放大观测误差)的问题,这是在 cm 级精度概念下大地测量面临的一个基础理论问题。因此,要实现确定 cm 级精度全球大地水准面还有

一段艰难的路程。首先要解决的问题是如何将新一代卫星重力数据与地面重力数据在 cm 级精度要求下联合确定全球重力场模型和大地水准面;进而研究如何利用 100 km 分辨率 cm 级精度全球大地水准面在经典理论框架下确定高分辨率(如 5 km)cm 级精度山区的局部(似)大地水准面。这也是近 5 a 来国际大地测量学术界最活跃的研究领域,有大量研究论文除了涉及上述两个基础理论及其相应处理方法的问题外,还涉及在 cm 级精度要求下重新研究 Stokes 公式核函数的改进和构造截断函数的问题,重新审视移去-恢复法研究频谱和精度匹配问题;重新探讨 Stokes-Helmert 方法中的重力归算问题,特别是向下延拓和间接影响问题,椭球改正问题再次引起了研究热潮;更有研究完全抛弃 Stokes 方法恢复高分辨率 cm 级精度局部重力场的理论和算法。以上研究趋势反映了在当今大地测量发展的这一特殊阶段普遍思考的问题<sup>[4,5]</sup>,即有了 cm 级精度的 100 km 分辨率的卫星重力模型,如何确定相同分辨率和精度水平的全球大地水准面,又如何据此确定高分辨率 1 cm 精度的局部(似)大地水准面。

如何利用新一代卫星重力数据恢复全球重力场是目前国内外大地测量最活跃的研究领域之一,表现为在过去 20 多年模拟预研成果的基础上进入基于实测数据寻求实用高效精密解算方法的方向。近年已提出了多种方法,主要包括动力法、简化动力法、能量法、加速度法、短弧运动学法、整体平差法等;并推出了多个卫星重力模型系列,主要包括 EIGEN(CHAMP)系列、EIGEN-GRACE 系列、EIGEN-CG 系列(GFZ 研制)、GGM 系列(UTCSR, JPL 研制)以及 ITG-CHAMP01(柏林大学研制)等,其中,GFZ 和 UTCSR 均采用动力法。另外,集中于误差分析和模型检验的研究,只有少数研究了卫星重力数据与地面和航空重力联合求解位模型的问题。应该说,由于新一代卫星任务还在实施之中,尚未形成成熟的解算方法和技术系统,各种应用研究还刚起步,而且还存在如前所述的若干尚待深入研究的基础理论问题,特别是如何跨越经典理论框架,发展新理论和新方法,是当前在此领域面临的挑战。利用卫星测高数据恢复重力场的理论和方法在 dm 级精度水平上已趋于成熟,此技术可望作为监测海洋的一种有效工具长期持续下去,如何进一步改进精度仍存在研究空间,如其中的一个基础理论问题及其影响和解决方案仍在研究之中,即重力-测高边值问题相容性条件问题曾证明此边值问题若不对沿

海岸线的边界数据加平滑条件(包括系统误差),理论上不存在解,这就是所谓的陆海大地水准面的接边问题。

## 2.2 由高分辨率数字高程模型恢复重力场短波信息

2000年2月,美国“奋进”号航天飞机执行了雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)。这次航天测绘覆盖面积之广、采集数据量之大、精度之高在测绘史上是前所未有的。10 d采集的全部原始数据仅处理就约需2 a的时间。数据经处理后,最终所获得的全球数字高程模型(DEM)可以将现有的全球DEM精度提高约30倍。目前,美国地质调查局已经释放了SRTM数据处理后的三个版本的 $3'' \times 3''$ 全球和北美的 $1'' \times 1''$ 数字高程模型,其平面位置精度为 $1\sim 2$  m,高程精度为16 m。

高精度、高分辨率地形资料可为地球重力场的确定提供丰富的重力场短波信息,尤其是在重力空白地区可利用地形资料和地形均衡理论推估重力异常,提高其大地水准面精度。

确定1 cm级精度水平大地水准面需利用密集的地形资料,而且要精确计算第二类Helmert凝集法中的各类地形位及地形引力的影响,即牛顿地形质量引力位和凝集层位间的残差地形位的间接影响,以及Helmert重力异常由地形质量引力位和凝集层位所产生的引力影响。同时,还需在Helmert重力异常中顾及似大地水准面与大地水准面之间的改正,以及椭球上延至Helmert似地形面的正常重力改正等<sup>[6,7]</sup>,以高阶积分核函数提高地形引力(重力场短波信息)对大地水准面的贡献。

无论是在地形均衡归算,还是计算地形质量对大地水准面的直接和间接影响中,各类改正都必须使用精确的球面公式,然而目前还没有严格的快速计算方法处理像 $3'' \times 3''$ 的地形资料,即使采用高性能计算机处理也是难以实现的。因此,必须考虑在严密球面积分公式的基础上发展精确的快速计算方法。

## 2.3 地面重力资料恢复重力场中波信息

地面重力异常主要包括了大地水准面中波信息,是决定大地水准面精度的主要因素。重力测量是在地球表面进行观测的,测得的结果是一些分布不规则的离散点重力值。由于局部空间重力异常变化规律极其复杂,若按点空间平均重力异常的简单平均数作为格网的平均值将会带来相当大的误差,因此,在求取平均空间重力异常时,

必须先将点重力异常归算至平滑的归算面上,以减少地形起伏对重力异常的影响。重力异常的归算方法通常有布格归算、地形均衡归算和残差地形模型。实践表明,地形均衡异常比布格异常更平滑,一般在均衡抵偿好的地区没有布格异常的系统性效应,地形均衡归算比残差地形模型有更严密的理论基础。因此,研究适合离散重力场的内插和推估方法,确保格网平均重力异常精度是提高大地水准面精度的关键。同时,在海域重力异常的反演方面,研究多代卫星测高资料,恢复海洋重力异常的新理论和新技术,用来获得高精度重力异常提高陆海交界的精度,减小海洋重力异常对陆地大地水准面的影响。

## 3 中国局部大地水准面的研究进展及主要成果

自2005年以来,我国局部大地水准面的研究取得了突破性进展。在地球重力场的归算中,提出了严密的陆海统一算法,并导出了顾及地球曲率的严密球面积分公式,提高了地形均衡异常的计算精度,确保了陆海地区格网重力异常的精度。在格网重力异常的内插和推估中,引入了利用曲率连续张量样条算法进行内插,这一内插方法适合重力数据稀少、分布极不均匀和地形复杂的地区,该方法是在最小曲率法的基础上增加了一些自由度,并松弛了曲率最小化的限制。要求拟合曲面具有连续二阶导数,且全局性曲率平方最小,它能够准确拟合已知数据点(无拟合误差),但是,最小曲率拟合曲面在已知数据点之间的区域可能存在较大的波动和无关变形点,导致其格网化效果不是十分理想。在弹性薄板弯曲方程中引入张力参数,可以消除拟合曲面中存在的无关变形点,同时,引入张力参数可以将最小曲率格网插值算法推广为一个更具普遍性的算法。利用连续曲率张力样条法对位场和地形数据进行格网化是可行的,它的解比最小曲率法的解更具局部性质,并且更能反映出位场和地形数据的空间自相关性<sup>[8]</sup>。

我国首次提出采用第二类Helmert凝集法确定大地水准面,而且导出了顾及地球曲率的各类地形位及地形引力的间接和直接影响严密球面积分公式。第二类Helmert凝集法可有效地估计调整大地水准面外部质量以及凝集层的地形引力和地形位的影响。地形质量的移去和恢复采用Helmert的第二质量凝集法,将移去的质量压缩到大地水准面上成一薄层(凝集层),由此得到大

地水准面上的 Helmert 重力异常,其值为地面点重力值加地形引力的直接影响(地形改正)、凝集重力改正以及空间改正,再减去对应椭球面上的正常重力值,按 Stokes 积分求解获得的值再加地形位和凝集层位产生的间接影响<sup>[9-11]</sup>。

在格网重力大地水准面与离散 GPS 水准的联合方面,提出了利用球冠谐调和分析方法,可在满足 Laplace 方程的条件下将重力似大地水准面与 GPS 水准联合求解。球冠谐分析方法可以克服经典空域离散积分公式在理论分析上和实际上的局限性。理论上兼有全球谱表达的优点,又冲破了其向更高分辨率扩展的限制,实用上由于它是一个收敛速度很快的解析连续展开式,因此,可大幅度提高局部重力场的计算效率和理论的严密性。

2005 年以来,在广东、广西、山西建立了 5 cm 精度水平的全省统一似大地水准面;2007 年,在我国东西跨度约 1 700 km、地形起伏 6 000 m 的甘肃省获得了 8 cm 的精度。自 2003~2005 年期间,在城市似大地水准面的研究中,先后在无锡、青岛、常州、大同、晋中、长治、朔州、哈尔滨松北区等实现的城市大地水准面的精度在 2 cm 的水平,似大地水准面采用的方法是 Molodensky 级数的一阶解。2006 年以来,在东莞建立了我国第一个 1 cm 精度城市似大地水准面,相继在广州、沈阳、镇江、苏州、武汉和南京等城市也实现了 1 cm 精度似大地水准面的确定。1 cm 精度不同于 cm 级,它可以揭示地球内部岩石圈的特征,对大地测量的应用可以在 25 km 范围内满足二等精密水准测量的要求,进而使我国似大地水准面的研究取得了突破性进展,具有划时代的意义。

下面给出了我国具有代表性的东莞、广州、武汉和南京 1 cm 精度城市似大地水准面的成果。在这些成果的计算中,格网空间重力异常的内插和推估利用了 Airy-Haiskanen 地形均衡归算,通过移去-恢复原理计算,东莞和广州的格网重力异常采用了 Shepard 方法,武汉和南京采用了连续曲率张力样条法格网化。理论和实践表明,后者优于前者,更能反映出位场数据的空间自相关性。东莞和广州的重力似大地水准面是 Molodensky 级数的一阶解,武汉和南京的成果是由求解 Stokes-Helmert 边值问题得出的,其地面点重力值加地形引力的直接影响、凝集层重力改正以及大地水准面的地形位和凝集层位的间接影响均采用了顾及地球曲率的严密球面积分公式。表 1 给出了 4 个城市独立 GPS 水准与重力似大地水准

面(如图 1 至图 4 所示)的比较结果,广州和南京的水准和 GPS 成果由于不是同期观测,有 2~3 a 的时间跨度,标石的不均匀变化导致了重力似大地水准面的精度略低。GPS 水准与重力似大地水准面独立比较是反映真实精度的客观指标,相反,通过数学函数拟合方法给出的精度是不真实的。为了将重力似大地水准面连接到国家 1985 黄海高程基准上,这 4 个城市均采用了满足 Laplace 方程的局部球冠谐调和分析方法,其结果见表 2。通过独立的高精度 GPS 水准与最终的似大地水准面进行外部核算(见表 3),精度均优于 1 cm。图 5 至图 8 是重力似大地水准面与最终似大地水准面的差异等值线图,差值越小,越能反映最终成果精度的真实性和可靠性,反之亦然。从图 5 至图 8 可以看出,其差值最大只有几个 cm,均近乎为零,反映了这 4 个城市 1 cm 精度似大地水准面具有很高的可靠性。

表 1 独立 GPS 水准与重力似大地水准面高的比较  
Tab. 1 Comparison Between Independent GPS Leveling and Gravimetric Quasi-geoid

| 地名 | 点数  | 最大值/m | 最小值/m  | 偏差/m   | 均方根/m  | 标准差/m  |
|----|-----|-------|--------|--------|--------|--------|
| 东莞 | 62  | 0.025 | -0.033 | -0.214 | ±0.215 | ±0.012 |
| 广州 | 143 | 0.059 | -0.076 | -5.254 | ±5.254 | ±0.029 |
| 武汉 | 164 | 0.033 | -0.046 | -0.209 | ±0.210 | ±0.012 |
| 南京 | 143 | 0.036 | -0.044 | -0.185 | ±0.185 | ±0.014 |

表 2 GPS 水准与 GPS 似大地水准面高的残差统计  
Tab. 2 Comparison Between GPS Leveling and GPS Quasi-geoid

| 地名 | 点数  | 最大值/m | 最小值/m  | 偏差/m  | 均方根/m  | 标准差/m  |
|----|-----|-------|--------|-------|--------|--------|
| 东莞 | 62  | 0.014 | -0.014 | 0.000 | ±0.006 | ±0.006 |
| 广州 | 143 | 0.029 | -0.026 | 0.000 | ±0.011 | ±0.011 |
| 武汉 | 164 | 0.018 | -0.017 | 0.000 | ±0.006 | ±0.006 |
| 南京 | 143 | 0.021 | -0.030 | 0.000 | ±0.008 | ±0.008 |

表 3 独立 GPS 水准的外部核算结果

Tab. 3 External Check of Independent GPS Leveling

| 地名 | 点数 | 最大值/m | 最小值/m  | 偏差/m  | 均方根/m  | 标准差/m  |
|----|----|-------|--------|-------|--------|--------|
| 东莞 | 15 | 0.013 | 0.009  | 0.001 | ±0.006 | ±0.006 |
| 广州 | 38 | 0.009 | -0.017 | 0.003 | ±0.008 | ±0.007 |
| 武汉 | 30 | 0.020 | -0.017 | 0.002 | ±0.008 | ±0.007 |
| 南京 | 25 | 0.019 | -0.015 | 0.003 | ±0.009 | ±0.008 |

## 4 结语

确定 1 cm 精度大地水准面不仅需要在理论方面研究大地测量边值问题,进一步改进和统一现有地球重力场确定的理论和方法,需要研究全球参考系及一致性定义(如永久潮汐)等问题,而且在数据处理技术方面,应研究地形资料、重力资

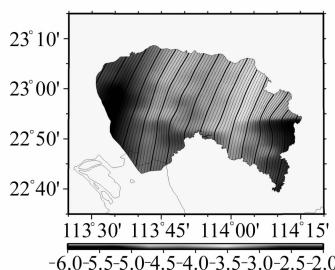


图1 东莞似大地水准面  
Fig. 1 Dongguan Quasi-geoid

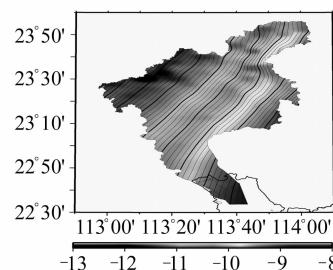


图2 广州似大地水准面  
Fig. 2 Guangzhou Quasi-geoid

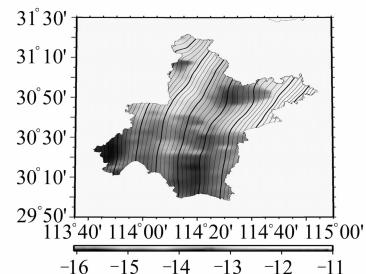


图3 武汉似大地水准面  
Fig. 3 Wuhan Quasi-geoid

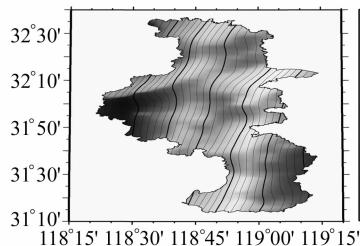


图4 南京似大地水准面  
Fig. 4 Nanjing Quasi-geoid

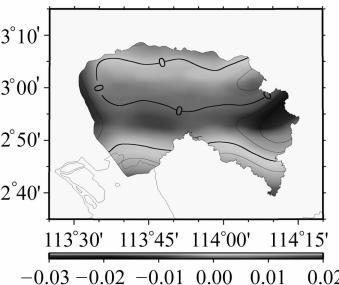


图5 东莞重力似大地水准面与  
GPS似大地水准面的差异  
Fig. 5 Differences Between  
Gravimetric and GPS  
Quasi-geoid of Dongguan

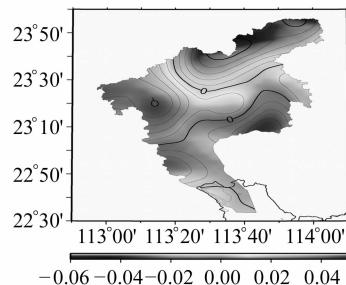


图6 广州重力似大地水准面与  
GPS似大地水准面的差异  
Fig. 6 Differences Between  
Gravimetric and GPS  
Quasi-geoid of Guangzhou

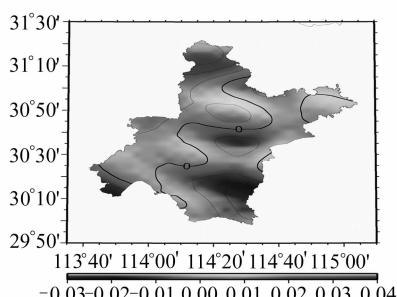


图7 武汉重力似大地水准面与GPS似大地  
水准面的差异  
Fig. 7 Differences Between Gravimetric and GPS  
Quasi-geoid of Wuhan

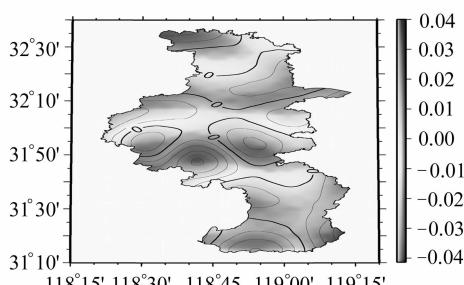


图8 南京重力似大地水准面与GPS似大地  
水准面的差异  
Fig. 8 Differences Between Gravimetric and GPS  
Quasi-geoid of Nanjing

料、GPS水准、多源卫星测高数据以及全球重力场模型的最优数据联合和误差模型。在地球重力场长波方面,充分利用卫星地球重力场模型(多种重力探测卫星资料的联合)与地面重力数据的联合解模型,以期获得高精度长波大地水准面信息。在中波方面,应使用更加完善的地形均衡重力归算精确算法,提高地形和均衡改正的数值计算精度,研究适合离散重力场的内插和推估方法,确保格网平均重力异常精度提高到一个新的水平。在地球重力场短波恢复方面,改善积分核函数提高高分辨率地形数据的贡献,需精确计算第二类 Helmert 凝集法中的各类地形位(间接)及地形引力(直接)影响以及 Helmert 重力异常由地形质量引力位和凝集层位所产生的引力影响。同时,还需在 Helmert 重力异常中顾及似大地水准面与大地水准面之间的改正,以及椭球上延至 Helmert 似地形面的正常重力改正、椭球改正、大气影响以及重力异常的向下延拓等。在 GPS 与重力大地水准面两种独立数据源的大地水准面联合方面,摒弃理论上不正确的多项式、曲面等几何拟合方法,应采用满足 Laplace 方程的调和函数解的球冠谐分析方法,使大地水准面的解更加严密,成果更加可靠。

总之,理论及方法的不断完善和数据的不断丰富必将使我国大地水准面的精度提高一个新的水平,可望在我国统一似大地水准面的研究中,东部达到15 cm和西部达到30 cm的精度水平;省级大地水准面精度达到3~5 cm(东部)和10~20 cm(西部),城市大地水准面的精度优于1 cm,全面实现GPS结合似大地水准面代替二等水准测量,完成我国高程测定的里程碑式跨越和革命性转变。

## 参 考 文 献

- [1] 李建成,宁津生.局部大地水准面精化的理论和方法//陈永龄院士九十寿辰专辑[M].北京:测绘出版社,1999:71-83
- [2] 李建成,陈俊勇,宁津生,等.地球重力场逼近理论与中国2000似大地水准面的确定[M].武汉:武汉大学出版社,2003
- [3] Lemoine F G, Kenyon S C, Factor J K, et al. The Development of the Joint NASA GSFC and the NIMA Geopotential Model EGM96[R]. NASA TP-1998-206861, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1996
- [4] Martinec Z. Boundary-Value Problems for Gravimetric Determination of a Precise Geoid[M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1998
- [5] Jekeli C, Serpas J G. Review and Numerical Assessment of the Direct Topographical Reduction in Geoid Determination[J]. J Geod, 2003, 77: 226-239
- [6] Huang J, Sideris M G, Vaněček P, et al. Numerical Investigation of Downward Continuation Techniques for Gravity Anomalies[J]. Boletino Di Geodesia E Scienze Affini LXII, 2003a(1): 33-48
- [7] Huang J, V eronneau M, Pagiatakis S D. On the Ellipsoidal Correction to the Spherical Stokes Solution of the Gravimetric Geoid[J]. J Geod, 2003b, 77: 171-181
- [8] Smith W H F, Wessel P. Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension[J]. Geophysics, 1990, 55: 293-305
- [9] Martinec Z, Matyska C, Grafarend E W, et al. On Helmert's Second Condensation Technique [J]. Manuscr Geod, 1993, 19: 213-219
- [10] Martinec Z. Stability Investigations of a Discrete Downward Continuation Problem for Geoid Determination in the Canadian Rocky Mountains[J]. J Geod, 1996, 70: 805-828
- [11] Vaněček P, Huang J, Novak P, et al. Determination of the Boundary Values for the Stokes-Helmert Problem[J]. J Geod, 1999, 73: 180-192

**作者简介:**李建成,教授,博士,博士生导师,长江学者。主要从事物理大地测量学和卫星大地测量学的研究。

E-mail:jcli@whu.edu.cn

## Study and Progress in Theories and Crucial Techniques of Modern Height Measurement in China

LI Jiancheng<sup>1</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(1 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The scientific significance, function and application of geoid in geodesy and related geoscience are elaborated. The conception of combining GPS with high precision geoid to replace leveling in China is brought forward. The prerequisites of long wave, medium wave and short wave of Earth's gravity field to compute geoid with cm-level accuracy are analyzed. Some crucial techniques, necessity and feasibility of determining city geoid with 1 cm and provincial geoid with 5 cm are discussed. The main theoretical problems and mainly crucial techniques to be solved in cm-level geoid determination in China are presented as well. And the main progress and achievement of regional geoid determination in China are reviewed.

**Key words:** Earth's gravity field; geoid; height measurement