

跟踪世界发展动态 致力地球重力场研究

宁津生¹

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要:比较系统、扼要地叙述了笔者所在单位 40 余年来坚持跟踪世界发展动态, 致力于地球重力场理论和方法的研究, 并从教学和生产需要出发, 在地球重力场研究方面所获得的一些有理论意义和实用价值的成果。

关键词:地球重力场; 地球重力场模型; (似)大地水准面; 卫星重力探测技术

中图法分类号: P312. 1; P223. 0

大地测量学乃至测绘学是对地球进行测量和描述的学科。地球重力场的研究始终是大地测量科学研究的核心问题, 也是现代大地测量发展中最活跃的领域之一。更因为地球重力场是地球的一个物理特性, 它可以反映地球内部物质分布、运动和变化状态, 并制约地球本身及其邻近空间的一切物理事件, 因此研究地球重力场也是地球科学的一项基础性任务。地球重力场在传统大地测量中的任务是在物理空间(即地球重力场中)的各类大地测量观测数据通过地球重力场参数转化到几何空间(即参考椭球体上), 便于进行大地位置的数学计算。因此, 地球重力场的观测数据和各种参数对地面大地测量的定位是起辅助作用的。而现代大地测量是以空间技术手段(如 GPS)进行三维地心坐标的定位, 这种定位方式无需由物理空间向几何空间的转换, 此时研究地球重力场是为了定位卫星的精密定轨, 它的精度决定卫星大地测量定位的精度。因为后者需要精细地球重力场的支持, 因此地球重力场对卫星大地测量起着关键性的作用。由此可见, 无论是传统大地测量, 还是现代大地测量, 地球重力场在其中具有不可替代的作用, 尤其是在以基础地学研究为主的现代大地测量整体框架中, 研究地球重力场的物理大地测量学和空间大地测量学将相互紧密结合组成大地测量学科的支柱, 共同主导学科的发展。基于这样的原因, 从 1956 年原武汉测绘学院的大地测量系到今天的武汉大学测绘学院, 从事地球重力场研究的教师们始终密切关注国内外发展动态, 坚持对地球重力场的研究,

并在教学中不断充实和更新大地测量专业的主要专业课之一——物理大地测量学(原称大地重力学)的内容。

1 从斯托克司理论到莫洛坚斯基理论

我们的研究是从实践开始的。1957 年参与了当时国家测绘总局在全国范围内建立“57 国家重力基本网”的工作, 接着在 1958 年学校聘请了原苏联莫斯科测绘学院的布洛瓦尔(V. V. Brovar)教授前来系统而全面地讲授莫洛坚斯基(M. S. Molodensky)真地球形状理论。从此, 我国的地球重力场理论研究和生产实践就从斯托克司理论框架全盘转化到莫洛坚斯基理论框架。例如, 在建立全国天文大地网中将旧的三角测量处理中需二次归算的展开法过渡到仅需一次归算的投影法; 推求大地高由原来采用大地水准面差距转变为采用高程异常(即似大地水准面概念), 其中引进了天文重力水准方法; 高程系统则由原来的正高转变成正常高等等。这一切都是基于莫洛坚斯基理论所确定的地球自然表面形状, 其理论是严密的, 相对地说克服了斯托克司理论中由于重力归算等引进的非真实性假设而引起的大地水准面不确定性的理论缺陷, 从理论上说可以提高大地测量确定地球形状和地球重力场以及定位的精度。随后, 国家测绘总局在全国范围内建立国家天文大地网(即 80 坐标系), 并在全国布设天

文重力水准网,以满足建立国家天文大地网中归算大地测量观测数据的需要。为了这种需要,同时也为了教学的需要,我们对莫洛坚斯基理论及其天文重力水准的理论、方法和精度进行了更深入的理解和研究,特别是对由布洛瓦尔为我国设计的天文重力水准和相应的加密重力测量的布设方案,结合我国的具体情况提出了修改和完善的意见,研究了天文重力水准对重力资料的精度要求,其中包括对莫洛坚斯基和方俊两个天文重力水准计算模板进行了比较,并在理论研究的基础上对天文重力水准方法进行了较全面的试验。这些研究成果部分地被收入我国修订的《天文重力水准测量细则》,为我国开展天文重力水准测量工作提供了某些理论依据和标准。至70年代初,为了确定我国大地原点的地心坐标及参考椭球定位,我们承担了当时国家测绘总局的测绘科技项目,对应用重力资料推求高程异常和垂线偏差的精度进行了估计和分析,为其提供理论依据和计算原则。

2 从确定论的解析法到随机论的统计法

无论是斯托克司理论,还是莫洛坚斯基理论都属于确定论的解析法的范畴,而近20多年来,地球重力场的基础理论研究特别活跃。最小二乘平差在大地测量以及整个测绘学科中用于数据处理,是每个测绘工作者非常熟悉的事。最小二乘法开始在地球重力场研究中只是用于重力异常的内插和推估,之后经过对最小二乘平差和最小二乘推估之间内在关系的研究,丹麦的克拉鲁普(T. Krarup)发现了最小二乘推估法就是具有核函数的希尔伯特空间中的最小二乘平差法,从而弄清了这种关系的数学结构,因而他进一步提出了一种广义的最小二乘理论,即最小二乘配置法,并用于估算地球重力场的任一参数。这就形成了地球重力场研究的统计理论框架。这种理论被引进到我国后,我们即着手开展确定相对大地水准面的最小二乘配置理论和方法的研究。随后在80年代初学校先后邀请了丹麦的希尔宁(C. C. Tscherning)教授和奥地利的莫里兹(H. Moritz)教授前来学校系统地讲授地球重力场研究中的最小二乘配置理论和高等物理大地测量。由于这种方法是一种依据随机论的统计方法,它相对于依据确定论的解析法来说,其最大优点是能综合利用地球重力场中的各类观测数据,按照最佳频谱匹配去逼近地球重力场;观测量和计算

量两者可以是完全不同类的量;它能给出按可供利用的数据所能得到的最优解,并且所得到的信号场(地球重力场参数)能与已知数据保持场结构的一致性,同时在确定重力场的数据处理中能估计观测误差。我们对以上这些问题都作了较系统的研究,其中包括相对大地水准面的计算公式,基本协方差函数,协方差传播定律和封闭协方差函数表达式以及局部经验协方差等,同时进行了试验计算,估计了结果的精度,并将研究结果用于教学、科研和生产中去。

与最小二乘配置理论有关的是1971年克拉鲁普提出的整体大地测量概念。它的主要特点是将各类大地测量观测量表达为几何相依量和重力位的非线性泛函,经线性化后成为包含几何参数和重力场信号的观测方程,并进行整体解算。自1987年以来,我们对这一新领域进行了较深入的探讨,做了以下研究工作:①提出了三种新的整体大地测量确定性参数模型,即重力异常B样条拟合模型,超定边值问题的样条函数解和点质量模型;②研究了整体大地测量的误差分析方法,应用影响率和增益影响率定量地分析了各类观测量对整体解的影响,应用方差分量估计探讨了整体大地测量随机模型的确定问题;③根据确定性参数模型研制了整体大地测量软件CH-OPERA,并且建立一个高精度的大地测量试验网供试验计算和分析用。我们所研究的确定性参数模型与配置法一样是整体大地测量的严密方法,可以有效地应用于GPS、重力和水准测量的联合处理以确定地球重力场的精细结构,并可用于解算物理大地测量的超定边值问题以及地球动力学等课题的研究。

3 从地面资料研究地球重力场到卫星重力学

自从第一颗人造地球卫星斯普特尼克1号(Sputnik-1)于1957年10月4日发射成功以来,它为测绘学科的发展开辟了新的途径。在这以前研究地球重力场都只限于地面的天文、大地和重力测量资料的应用,而人造地球卫星可当成地球重力场的探测器或传感器,对卫星的观测并获取与地球重力场有关的观测数据已成为研究地球重力场的新的重要手段,因而形成卫星重力学。

传统的地面重力测量技术,由于其耗时多、劳动强度大,并有许多难以到达的地区,致使重力测量的地面覆盖率和分辨率受到极大的限制,而卫星重力探测技术则是为解决全球高覆盖率和高分辨

率重力测量开辟了新的有效途径。卫星重力探测技术主要有:地面跟踪观测卫星轨道摄动、卫星测高、卫星跟踪卫星和卫星重力梯度测量,其中我们对卫星测高和卫星重力梯度测量确定地球重力场的理论和方法进行了较多的研究,并在某些方面有自己的发展。从球坐标形式的 Laplace 方程出发,导出了利用卫星测高数据源获得的垂线偏差求解海洋重力异常的严密数学公式,改善了 Sandwell 方法的平面近似公式;提出了利用逆维宁·曼尼兹公式恢复重力异常的新思想,并导出了利用 FFT/FHT 技术计算维宁·曼尼兹公式的完整严密卷积表达式。卫星测高数据可以直接用于研究海洋大地水准面的形状,同时还可以依据大地水准面高和重力异常之间的关系反演海洋区域的重力异常,其精度取决于海洋测高数据本身的精度,因此针对测高卫星轨道及地面轨迹所独有的特点,较系统地研究了卫星测高数据处理的理论和方法,内容涵盖了测高卫星径向轨道误差的时域特征分析和空域特征分析、共线轨迹与交叉点分布等的谱特征和整体求解法的研究等,获得了若干有参考价值的甚至尚未有人探讨过的结果。对于卫星重力梯度测量技术,主要对卫星重力梯度边值问题进行研究。这种卫星重力探测技术旨在利用这一新的信息源改善中波段地球重力场。为此我们着重研究了利用卫星重力梯度数据逼近地球重力场的理论和方法。首先,从现代大地测量边值问题的理论出发,论证了卫星重力梯度单定边值问题的适定性问题;依据超定边值问题的准解理论获得卫星重力梯度超定边值问题和重力-重力梯度边值问题的准解,并给出了具体求解原则和实用解算模型。其次,利用希尔伯特空间的函数展开理论和 Sobolev 空间的算子理论,深入研究了一种卫星重力梯度张量的球谐分析和综合方法,并且导出了求解扰动位球谐系数的简便易算的实用数学模型,论证了其适定性问题。在局部重力场逼近方面,提出了卫星重力梯度向下延拓的平面近似法和频域最小二乘配置法,导出了相应的计算模型。对于当前正在发展的新一代卫星重力探测计划 CHAMP(高-低卫星跟踪卫星模式),GRACE(高-低和低-低卫星跟踪卫星模式),GOCE(高-低卫星跟踪卫星和卫星重力梯度测量模式),我们正在密切关注和跟踪它们在确定地球重力场方面的有关理论、技术和方法及其数据处理等方面的研究进展。

4 从地球重力场模型到大地水准面

当前确定地球重力场的理论可以归结为地球

重力场模型的理论及其位系数计算与大地水准面的确定及其精化。

早在 1984 年,当国外的 Rapp 和 GEM-10C 两个地球重力模型出现并被引进我国时,我们就用其位系数推算重力场参数的方法和它们对我国局部重力场的适应情况进行了探讨和分析,发现它们并不能很好地反映我国局部重力场的情况,尤其是它们并不因顾及了高阶项而提高推算地球重力场参数的精度。产生这种情况的原因主要是国外的这些模型在推算位系数时未能顾及我国局部重力场的的数据,因此从 1987 年始,我们在国家自然科学基金的支持下开始利用我国局部重力场的观测数据研制适应我国情况的地球重力场模型。在 1989 年发表了我們研制的第一个高阶模型 WDM89(180 完全阶次),模型的联合平差采用 GEM-T1 模型作为先验位系数,高阶系数用最小二乘配置法求得。在研制中作了如下几点改进:①在条件方程中将待定位系数作了独特的排序,使法方程矩阵成为一个分块对角矩阵,简化了矩阵的求逆计算,减少了联合平差的计算工作量;②采用严密平差方法,摒弃了通常的近似平差法,提高了模型的精度;③在 Legendre 函数积分中用向后递推法避免误差向高阶积累,同时对位系数计算的积分公式采用了 FFT 算法。在求解高阶位系数的最小二乘配置法中为了组成和解算 64 800 阶的法方程矩阵,充分利用等间隔格网数据的全球分布及球谐函数的正交性,简化了计算公式和矩阵结构,使其成为一个分块 Toeplitz 循环矩阵,大大压缩了存储量,使得在当时的计算机条件下这样高阶逆矩阵的计算得以实现。对该模型所作的多种检验表明,与国外同阶次模型相比,表达我国重力场的精度有较大改善。1992 年在国家测绘局测绘科技发展基金支持下又以 OSU91 模型为基础利用剪接法结合中国陆地 $30' \times 30'$ 空间重力异常研制了 WDM92CH 模型(360 完全阶次),在此模型基础上继续进行改善,于 1994 年正式发表了更高阶次的 WDM94 模型(360 完全阶次)。在计算模型时顾及正常重力二阶垂直梯度影响、大气改正以及三项椭球改正的重力异常,先进行椭球谐调和展开,再利用椭球谐和球谐展开的转换关系转化为球谐系数,位系数按广义最小二乘法将地面数据与低阶卫星重力模型联合求解。外部检核结果表明,该模型在表达中国境内重力场方面优于当时先进的 OSU91 模型,它的高频部分在反映我国局部重力场方面确有明显改善的效果。我国的地质学家多次应用该模型分阶窗研究我国大地构造,获得多项新成果,也证实比国外模型(如

OSU91)更适合于解释我国的大地构造。由WDM94模型计算的大地水准面高和重力异常为华南地区壳幔结构及地球动力学背景、青藏高原壳幔结构和深部构造特征的研究提供了重要的基础数据,它不同阶窗计算结果的解释与地质解释具有相同的结论。

以上模型系列仍属全球重力场模型。此外,我们还提出了两种局部重力场模型:①将全球位模型整数阶球谐展开推广到局部重力场,利用局部重力数据作调和与分析,建立非整数阶球冠阶展开模型。利用中国境内 $30' \times 30'$ 平均重力异常数据计算到展开式的24次项,经检验,大地水准面差距的模型值与实测值的均方差平均为 $\pm 0.32\text{m}$ 。②在局部直角坐标系下用分离变量法导出的Fourier展开的局部重力场模型,提出了用B样条拟合平滑格网平均重力异常,得到比一般球谐展开有更高收敛阶的Fourier展开模型。经检验,大地水准面的模型值与实测值之差的标准差为 $\pm 0.31\text{m}$ 。研究表明,这类局部展开模型是有其实用价值的。

大地水准面研究的主要内容是:①以大地测量边值问题理论为基础,分别采用斯托克司积分和莫洛斯基级数公式计算大地水准面和似大地水准面;②依据移去-恢复原理,采用地形均衡归算(移去)方法进行地面实测重力值的平滑、内插和推估,由此恢复格网平均空间重力异常,即在Any-Heiskanen地壳均衡理论的基础上,采用地形均衡归算在平滑的均衡面上结合FFT技术和Shepard方法内插和拟合并反算求解格网平均空间重力异常;③利用已知的地球重力场模型(如WDM94)按低通滤波原理和移去-恢复原理,由相对于模型值的残差重力异常确定区域大地水准面的短波分量,然后再加上模型值恢复高分辨率的大地水准面;④在实际计算中实现了快速Hartley变换(FHT)算法,其速度较FFT快1倍,内存节省一半;提出了利用坐标变换方法消除二维球面卷积公式因纬度近似产生的误差;推导出用一维FFT技术计算斯托克司公式和莫洛斯基级数公式的更精密的算法公式。利用上述研究成果我们先后完成了川西、中国陆地、陕甘宁、塔里木、海南岛和中国东南陆缘等地区的大地水准面的确定任务。这些局部地区大地水准面达到dm级的精度,其中海南岛大地水准面的精度达到9cm。90年代初,我们承担了国家测绘局“八五”重点攻关项目,利用我国约22万个重力点值和 $30'' \times 30''$ DTM以及WDM94模型计算了一个 $5' \times 5'$ 中国大地水准面WZD94,其实际精度为m级,这个重力大地水准面实际上是一个试验

性的研究成果。在“九五”期间我们同国家基础地理信息中心和陕西测绘局共同承担了国家测绘局的重点测绘科技项目,研制需直接用于测绘生产的高精度高分辨率和完整覆盖我国国土(包含海洋专属经济区)的新一代中国似大地水准面CQG2000。在研制过程中除了采用上述各种计算技术之外,我们还研究和实施了重力似大地水准面和GPS水准似大地水准面的拟合,海洋似大地水准面计算中的数学模型,以及近海海域似大地水准面与陆地似大地水准面的拼接等。最后我们综合利用了已有的尽可能收集到的实测的重力资料、DTM、GPS水准、海洋测高数据等,计算出这个似大地水准面,其分辨率为 $15' \times 15'$ 。考虑到在我国东西部重力测量、GPS水准、地形图比例尺等的不均匀和不一致性的现实,我们在全国范围内分3个区域对这个似大地水准面进行精度检核。经与中国地壳运动GPS网络工程中的80余个GPS水准点比较,在东经 108° 以东地区的精度为 $\pm 0.3\text{m}$ 左右,东经 108° 以西、北纬 36° 以北地区的精度为 $\pm 0.5\text{m}$ 左右,在东经 108° 以西、北纬 36° 以南地区的精度为 $\pm 0.6\text{m} \sim 0.7\text{m}$ 。这样精度的全国似大地水准,可以用于1:5万甚至1:1万比例尺测图中以GPS水准面代替几何水准测定正常高。

参 考 文 献

- 1 管泽霖, 宁津生. 地球形状及外部重力场. 北京: 测绘出版社, 1981
- 2 宁津生, 许厚泽. 大地测量学. 北京: 科学出版社, 1994
- 3 赫·莫里兹. 高等物理大地测量学(中译本). 北京: 测绘出版社, 1984
- 4 宁津生, 管泽霖. 物理大地测量现代进展和展望. 见: 中国科学院测量与地球物理研究所论文集. 北京: 测绘出版社, 1994
- 5 宁津生. 地球重力场逼近理论研究进展. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 310~313
- 6 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)
- 7 宁津生, 李 望. 大地球谐级数高阶项的计算及在我国的适应性. 见: 中国科学院测量与地球物理研究所专刊(第8号). 北京: 测绘出版社, 1984
- 8 李建成. 物理大地测量中的谱方法. [博士论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1993
- 9 罗志才. 利用卫星重力精度数据确定地球重力场的理论和方法. [博士论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1996
- 10 翟国君. 卫星测高数据处理的理论与方法. [博士论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1997

(下转第486页)

Simulation of Recovering Gravitational Potential Model from the Ephemerides of CHAMP

XU Houze¹ SHEN Yunzhong²

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 54 Xudong Road, Wuhan, China, 430077)

(2 Dept. of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, 1239 Siping Road Shanghai, China, 210094)

Abstract: Three methods with different arc length of integration are tested in this simulation to recover gravitational potential model from the ephemerides of CHAMP. The results show that the regularized method with suitable arc length of integration will improve the precision of recovering gravitational potential model. The precision of low degree harmonic coefficients from CHAMP observations is expected 1~2 magnitude better than any current gravitational potential model.

Key words: CHAMP; gravitational potential model; regularized method

About the author: XU Houze, researcher, Ph. D. supervisor, member of the Chinese Academy of Science. He is engaged in research work in the field of Geodesy and Geophysics.

E-mail: hsu@asch.whigg.ac.cn

(上接第 474 页)

- 11 李建成, 宁津生. 局部大地水准面精化的理论和方法. 测绘学报, 1999(专辑)
- 12 宁津生, 罗志才. 卫星跟踪卫星技术的进展及应用前景. 测绘科学, 2000(4)
- 13 宁津生, 管泽霖. WDM94 360 阶地球重力场模型的研究. 武汉测绘科技大学学报, 1994, 19(4): 283 ~ 291
- 14 宁津生. 地球重力场模型及其应用. 冶金测绘, 1994(2)
- 15 Ning J S. The Determination of Relative Geoid Height

by Least Squares Collocation. Calgary, Alberta, Canada Publication 60003 1985

- 16 Günter Seeber. Satellite Geodesy. Berlin; de Gruyter, 1993
- 17 Li J C, Chao D B. Spherical Cap Harmonic Expansion for Local Gravity Field Representation. Manuscripta Geodaetica 1995

作者简介: 宁津生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。现主要从事物理大地测量的研究。代表成果有我国地球重力场模型研制和大地水准面的精化等。

E-mail: jsning@wtums.edu.cn

Following the Developments of the World, Devoting to the Study on the Earth Gravity Field

NING Jingsheng¹

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

Abstract: The study of the theories and methods of the earth gravity field by the author and his colleagues follows the developments of the world, and the research results with theoretical significance and practical value are systematically described to the point.

Key words: earth gravity field; earth gravity field model; quasi-geoid; satellite gravity surveying technology

About the author: Ning Jingsheng, professor, Ph. D. supervisor, member of Chinese Academy of Engineering. His interested fields are physical geodesy. His typical achievements are the development of the earth gravity field model and geoid refining of China, etc.

E-mail: jsning@wtums.edu.cn