

我国地球形状及重力场研究的进展

方俊 许厚泽 张赤军

(中国科学院测量与地球物理研究所)

摘 要

本文总结了我国解放三十年来重力学上的成就。首先叙述了我国普遍重力测量工作。此外,围绕天文大地测量网的天文点周围进行了十分密集的重力测量,以保证天文重力水准计算的精度。还进行了作为地球物理勘探及其他科学研究所用的重力测量。由天文重力水准所得的天文大地高程异常图已经完成,空间异常及布格异常图正在编制之中。在理论研究方面,也进行了不少的工作。

地球形状及重力场研究是一门很重要的学科,它通过地面观测的重力异常(物理量)和大地水准面起伏(几何量)之间的内在联系,把重力测量的手段利用到以解决地球形状和确定地表面点坐标为主要内容的大地测量学中去,从而使重力学成为解决大地测量问题必不可少的分支。除去大地测量之外,随着科学的发展,重力场的研究在近代天体测量学、地球物理学及空间科学等方面都显示了越来越重要的作用。

解放前,我国的重力测量基础十分薄弱,从1895年法国人勒尔纳在上海徐家汇观象台测定第一个重力值,到1949年,全国总共只测定重力点200余处,使用仪器也较陈旧,据解放后对这些点的校验,误差约为5—10毫伽,至于重力学应用于地球形状的研究,则完全是空白。

解放后,我国的重力测量及研究工作进展十分迅速。

在重力测量方面,我国在1956—1957年间与苏联科学院地球物理所合作,建立了全国重力基本点和一等点共103处,基本点联测中误差为 ± 0.15 毫伽,一等点则为 ± 0.25 毫伽,这样,除少数地区外,全国大部分地区内最多每隔500公里即有一个基本点。在此基础上,我国测绘部门随后又建立了全国的二等重力测量网,密度约100—150公里一点,联测精度为 ± 0.5 毫伽。

从全国基本网出发,各部门为不同工作的需要,又进行了加密的重力测量,同时,地质及石油部门在沿海及大陆许多地区也作了大量的密集的测量。我国测绘部门根据国家天文大地网平差的要求,制定和进行了全国天文重力水准网的施测,天文重力水准方法在如此大面积内应用,在世界上还是比较早的。这个工作从1958年开始,在文化革命前完成。这个计划从我国地形条件及我国天文大地网的具体布置出发,沿全国一等三角锁上布设了两种精度的天文重力水准路线,即高精度和低精度路线。在高精度路线上,两天文点间相对垂线偏差的误差为 $\pm 0.5''$,低精度则为 $\pm 1.3''$ 。重力点的布置按照不同的地形条件而有多有少,并且采用了以最少点子达到最好精度的布点原则。这种布设方法可以

使全国三角锁上任何地点的高程异常(即大地水准面与参考椭球面的间隔)的均方误差不超过 3 米,以便保证三角测量的起算边的投影精度在百万分之一以内;并且同时能满足内插三角点上天文大地垂线偏差的要求,从而给全国大地网的归算及平差奠定基础。

随着空间科学的发展,要求我们提供出地面的平均重力异常,从而估计出地球重力场不规则所造成的影响,但是,过去的重力测量,除了天文点的周围以外,一般地区还是比较稀疏的。因此近年来,我国测绘部门制定了新的布点方案,根据这一方案,可以使 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 经纬度格网内的平均空间异常的精度达到 $\pm 3-5$ 毫伽。与此同时,还汇集了我国及全球大量重力资料,开展建立重力数据库的工作。我国重力点的密度大致如下:平原地区 100—300 平方公里一个点;丘陵地区 300—500 平方公里一个点;高原地区 500—1000 平方公里一个点。

在海洋重力方面,我国海洋部门曾多次进行我国沿海及太平洋地区的远洋重力调查,取得大批宝贵资料;地质、石油部门则对我国沿海也作了广泛的勘测。

根据获得的大量实际重力资料,在成果的处理、应用和分析方面,我国也作了大量的研究工作。

首先,全国天文大地水准面图已编制完成。如前所述,这一成果是由天文重力水准取得的。在天文重力水准的计算中,采用了以平均重力异常为基础的方格模板计算方案。为此,可以按距离的远近,划分不同大小的计算单元,并且可以尽量地将单元面积缩小,以保证所需要的精度。中国科学院测量与地球物理研究所还设计了按单独天文点先行推算然后拼接的计算方案。这个方案的优点是可以大大地节省工作量,避免了大量的重复计算工作,以及费事的换带计算。也便利了电算的程序编制。此外,还为其他的应用,如内插垂线偏差等提供了方便。

全国天文重力水准工作的完成,不但为大地测量数据的归算提供可靠的依据,同时也可以利用它来改正我国的天文大地水准,求得比较准确的大地水准面图。与国际上用人造卫星所推出的大地水准面相比较,可定出我国所使用的北京坐标系的坐标原点相对于地心系的位移,从而把我国的局部坐标系与地心坐标系相连接。

其次,全国 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 及 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 平均空间异常图也基本上编制完。这方面,国家有关测绘部门曾对空间及布格异常的代表误差值进行了大量的分析和统计计算,得到如下的系数值,列于下表。

地形类别	地 形 特 征	空间异常代表 误差系数 K	布格异常代表 误差系数 K
平 原	地势平坦,高度变化很小	0.50	
丘 陵	高程变化普遍在 300 米以下	0.84	
一般山区	高程变化普遍在 300—700 米之间	1.40	0.70
大 山 区	高程变化普遍在 700—1200 米之间	2.32	0.90
特大山区	高程变化普遍在 1200 米以上	3.90	1.10

由表可见,在我国地形条件下,选用布格异常作为一间接过渡来处理重力数据,由于其代表误差比空间异常小得多,则必然其精度将大大提高。根据这一原则,我国测绘部门还读取了全国 $5' \times 5'$ 到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 方格的平均高程值,并与中国科学院测量与地球物理研

研究所合作,考虑到重力点的平面分布和高程与空间异常的相关性,拟定了七种推求 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 方块平均空间异常的方案,进行试算和比较,并认为用划分子块及平差求解布格改正系数 b 值的方法以及莫利茨 (Moritz) 的最小二乘推估法较优。在此过程中也尝试了把国际上新近发展的最小二乘拟合推估技术用于重力推估中。关于局部协方差函数也作了统计计算,考虑到习用的由异常图上读取数据方法受异常图的内插精度及布点密度影响很大,我们使用重力点进行直接统计,采用最小二乘的估计方法。

与此同时,海洋部门对沿海及远洋的一些资料也作了同样的整理计算。

最后,为配合地球物理、地震等部门的需要,测绘部门完成了全国 $1/20$ 万布格异常图的编制工作。

在理论研究方面,近些年来也取得一些进展。

为了测定世界最高峰——珠穆朗玛峰的高程,我国测绘部门利用了天文、大地及重力等测量手段,通力配合,其中估计了各测点及珠峰峰顶的天文大地垂线偏差及重力值,以便把大地高化为正常高和正高。为此,运用了地壳均衡的理论进行内插,同样,在求珠峰点重力梯度时也采用了均衡理论,并取得较好的效果。

为了把我国的大地坐标系统一到地心坐标系中,测绘部门收集和分析了全球大陆的天文大地水准面图以及卫星测定的大地水准面,把它统一化算为属于我国北京坐标系的全球天文大地水准面图,并根据大地水准面中心就是地球质心的原理推算出参考系中心的地心坐标,达到相当高的精度。为验证这种方法,同样发展了用多普勒观测资料确定地心坐标和由重力资料确定地心坐标的方法和理论,三种方法推算出的结果符合得很好。

此外,国家有关测绘部门还利用美国戈达德 (Goddard) 飞行中心推导的 GEM 地球位系数结合美国 DMAAC 及该部门汇集的国内外最新的重力资料,联合求解了到 22 阶为止的地球重力位的球函数展式的系数,求解中,使用了考拉 (Kaula) 和拉普 (Rapp) 的两种解法,所得结果也符合得很好。

中国科学院测量与地球物理所对最小二乘拟推 (Collocation) 的实质及与最小二乘法的比较作了研究,并提出两种解法,即虚拟观测值法及间接关联平差方法,所得结果与经典的拟推法一致。在 1963 年该研究所还较详细地研究了斯托克斯 (Stokes) 函数的逼近及截断误差估计,把求解截断系数归结为一组线性代数方程组,便于电算,并指出莫洛琴斯基的截断系数在推导垂线偏差时并非最优的,为此,同样用最小平方逼近的方法,导入了用于垂线偏差计算的最优截断系数。最近,又对截断误差进行了分析,导出了高阶截断系数的近似表达式,并认为采用平方逼近方法,将使截断误差的量级大大减小,如果同时还考虑到界圆处的边值条件,还将使其收敛速度大大加快。测量与地球物理所还对扁率级的斯托克斯问题解,地形改正及 G_1 的计算区域和模板,用重力资料确定地面坐标,用天文大地和人卫观测得出的高程异常推求地心坐标,地壳均衡改正的电算问题,重力异常的推估,高空扰动位的推算以及卫星结合地面重力资料推求地球重力场等方面进行了广泛的研究。

在仪器试制方面,国家地质总局地质仪器厂及石油部石油仪器仪表厂生产了 ZS591、ZS2-67、ZSM-3 型石英弹簧重力仪及金属弹簧重力仪。前者结构原理与美国的沃登 (Worden) 及加拿大的 CG-2 型仪器相似,具有助动的弹性系统,仪器小而轻,只有 3—4 公

斤,其中 ZSM-3 型的精度可达 0.05 毫伽,已广泛使用在测绘、地质、石油及地震战线上;后者和美国的拉柯斯特 (LaCoste) 重力仪系统相似,是零长弹簧,采用助动系统及两重恒温,但没有密封。海洋重力仪方面,中国科学院测量与地球物理所 1965 年试制成功了 HSZ-2 型海洋石英重力仪,而在 1977 年又研制成功了 ZYZY 自动化远洋重力仪,经过海上调查及与 GSS-2 海洋重力仪进行比较,观测精度达 ± 3.1 毫伽。石油仪器仪表厂研制的 ZH-641 型海底重力仪早已投产,并用于沿海的重力勘探中,精度为 ± 0.5 毫伽。地质仪器厂则试制了弦丝型的海洋重力仪。

从 1966 年起,国家计量部门开始进行绝对重力测量的研究,采用自由落体以及激光干涉条纹和时间脉冲符合记数的方法,1975 年取得我国北京的第一个绝对重力值,精度为 ± 0.1 毫伽,经过这几年的改进,目前精度已达 ± 0.05 毫伽的量级。

在培养人材方面,建国以来,我国各有关高等院校和科研机构已经培养了一支这方面的科技队伍,他们在各个工作部门是一批骨干力量。

三十年来,我国地球形状和重力场方面的工作取得了重大的进展,在国民经济和国防建设中日益发挥着重要的作用,这些成绩都是在党和政府的领导和关怀下取得的,我们还应该看到,我们的基础还很薄弱,和国际的先进水平还相差一段不小距离。当前地球重力学的研究已有不少新的进展,概括而言有:

首先,随着空间技术的发展,地球重力场的确定已不再是单纯地依靠地面的重力测量。大家知道,地球表面重力场的不规则对卫星轨道产生摄动,反过来从观测到的摄动又可推求出地球重力场,这种互相制约的关系使得近二十年来卫星定轨和地球重力场测定的精度日益提高,地球模型不断改善,此外,一系列新的观测技术的发展,例如用卫星测高及多普勒技术可测定出地面点的高程异常值,用卫星梯度仪可测量出重力梯度值等等,这些观测数据都可反过来间接地推求出地球表面的重力值。显然,今后要精细地确定出地球的重力场,必须综合使用卫星观测技术和地面的实测重力,二者缺一不可。与此同时,在数据处理方面也必须新的创见,所谓的最小二乘拟推法就是其中的一种,其突出的优点是能把各种不同类的观测量结合起来估算出所欲求的某类量,从统计上,它属于极大似然的估计,为此必须事先知道这些观测量及欲求量之间的自协方差及互协方差函数,这些问题还有待解决。

其次,以前我国地球重力场的研究往往局限于地表面,作为归化大地测量数据的一种手段,而现在,研究空间引力场的问题已经提到日程上,例如,国际上继莫洛琴斯基之后,又发展了布耶哈玛尔的等效地球理论及莫利茨的叠代解,在重力场的表示方式上,除去使用球函数这种数学工具外,已引进了有限单元的方法,除去采用重力异常这一物理概念外,已开始引进一些新的概念,如单层密度或扰动质点等等,这些都是正在探索的问题。

最后,在利用地面重力研究地壳和上地幔构造方面,除去经典的配合人工地震确定莫霍面深度外,也面临许多新问题,由重力测量发展起来的地壳均衡理论目前正吸收一些卫星观测的成果并创建现代的所谓“实验均衡说”,已有人提出把地面重力场作为边值条件来研究上地幔的侧向不均匀性,关于重力场与热流的相关关系也在探索之中,这些,都有助于使重力场的地球物理解释方面大大深入一步。

总之,我们地球重力学研究所面临的还是极其艰巨的,与国际先进水平的差距仍

很大,这就要求我们脚踏实地努力学习,积极工作,不断吸取国外先进经验,迎头赶上,为实现我国的四化,推进科学的发展作出贡献。

RESEARCHES ON GRAVIMETRY AND FIGURE OF EARTH IN CHINA

Fang Tsün Xu Hou-ze Zhang Chi-jun

(Institute of Geodesy and Geophysics, Academia Sinica)

Abstract

The paper summarizes the gravimetrical works which were done during the 30-year's period after the founding of the People's Republic of China. First of all, we have accomplished the general gravity survey throughout the country. Besides, very dense gravity surveys were carried out around the astronomical points of the astro-geodetic nets, in order to provide the precisions for the calculations of the astro-gravimetric levellings. Other surveys were also done for special purposes, such as for geophysical prospectings and other scientific researches. Maps of astro-geodetic height anomalies obtained by the astro-gravimetric levellings were completed. Maps of free-air and Bouguer anomalies are now under compilation. For the theoretical researches, lots of works have also been carried out.