

卫星重力梯度测量的研究现状及其在物理大地测量中的应用前景*

宁津生 罗志才 晁定波

(武汉测绘科技大学现代地球动力学实验室, 武汉市珞喻路 39 号, 430070)

摘 要 阐述了卫星重力梯度测量的发展背景, 并对其研究现状作出了全面评述, 指出了尚需进一步研究的若干问题, 展望了该技术在物理大地测量中的应用前景。

关键词 卫星重力梯度测量; 物理大地测量; 地球重力场

分类号 P227; P312.1; P223

1 卫星重力梯度测量的发展背景

探测和研究地球重力场结构是地球科学的基础性工作, 也是大地测量学科的主要科学任务之一。本世纪重力探测技术的突破性进展, 以及与空间技术、卫星定位技术发展的交叉并进, 特别是现代地球科学强化地球深部结构和动力过程的研究, 对了解重力场精细结构提出了较高的要求, 大大突出了通过大地测量研究重力场的科学目标, 使物理大地测量面临着新的挑战。其跨世纪目标是确定 cm 级大地水准面, 而目前全球大地水准面的精细度与这一要求大约还相差一个量级。

考察现有重力探测技术的发展潜力, 单一卫星轨道跟踪适于确定长波 (2~36 阶) 重力场, 其重力相关观测量是异常场产生的轨道摄动, 但轨道摄动还受日月引力、地球潮汐以及大气和太阳光压等物理环境的影响, 其残余误差目前仍大于 cm 级; 其次, 卫星轨道的全球覆盖是不完善的, 若干高阶位系数之间强相关, 其产生的混叠和共振影响以及覆盖面不全只有精心设计多种不同卫星轨道倾角和运行周期才能解决。显然, 要发射大量有特定轨道根数的卫星实际上是不可能的, 这种影响也大于 cm 级水平。尽管目前已有文献展望下世纪 SLR 测距精度可达 mm 级^[1], 但作者认为, 用卫星跟踪法确定重力场模型的准确度不仅取决于测距精度, 还取决于卫星摄动观测方程的数学物理性质, 用这一技术确定 cm 级大地水准面似乎还需继续努力。卫星测高是目前精化海洋大地水准面最有效的技术手段, 它的直接观测量是海面高, 目前已达到 $3' \times 3'$ 的高分辨率 (Geosat GM 和 ERS-1, 168d 周期数据) 及 cm 级测距精度。但由于受海面地形的分辨率和准确度限制, 以及海潮残差和定轨误差等因素的影响, 利用该技术恢复海洋大地水准面要跨越优于 $\pm 10\text{cm}$ 量级的准确度已十分困难。地面重力测量技术获取的重力异常数据适于确定重力场所有各波段谱分量, 但受自然条件等因素的影响, 其数据的密度和分布受到了限制, 目前全球还存在不少重力空白区。

综上所述, 现有重力探测技术在进一步提高分辨率和准确度方面的改进潜力已很有限。在

收稿日期: 1996-07-30。宁津生, 男, 63 岁, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 现从事地球重力场研究。

* 国家自然科学基金资助项目, 编号 49374193

这一背景下提出了卫星重力梯度测量的设想,即直接测定重力位的二阶导数张量,旨在利用这一新型重力场观测数据精化中波段重力场,是实现重力场逼近跨世纪目标的新努力。

2 研究现状及其评述

80年代开始研究制订国际卫星重力梯度测量计划,其中包括欧洲空间局(ESA)的Aristoteles计划和美国宇航局(NASA)的超导重力梯度测量任务(SGGM)。前者的最终目标是获得100 km的空间分辨率、1 mGal精度的重力异常和3 cm精度的大地水准面,后者的目标可望以50 km的空间分辨率、2~3 mGal的准确度确定360阶地球重力场。自70年代以来,这一新技术领域得到了各国学者的广泛研究,概括起来主要集中在以下几个方面。

2.1 卫星重力梯度测量的原理及重力梯度仪的研究

自本世纪初匈牙利物理学家R. Fötvös设计出第一台重力梯度仪(Fötvös扭秤)以来,重力梯度测量的原理可分为两类:扭力测量和差分加速度测量。前者测定作用于检测质量的力矩来间接获取重力梯度值,后者通过测量两加速度计之间的加速度差来获得重力梯度观测值,因而可消除加速度计之间大部分公共误差的影响,较前者更有发展前景。目前卫星重力梯度测量主要采用差分加速度测量。

随着电子技术、计算机技术和低温超导技术的发展,重力梯度仪各方面的性能有显著改善,特别是超导量子干涉技术、低温微波空腔谐振技术、低噪声超导放大器和“超导负弹簧”技术的应用,使得重力梯度仪在灵敏度和稳定性方面取得了突破性进展。重力梯度仪的研究大致经历了从单轴旋转到三轴定向,从室温到超低温($<4.2\text{ K}$),从扭力、静电悬浮到超导的发展过程,仪器灵敏度日益提高。早期重力梯度仪的灵敏度为1E,常规室温型重力梯度仪的灵敏度为 10^{-2} E ,低温超导重力梯度仪的灵敏度发展到 10^{-4} E ,未来超导重力梯度仪的灵敏度可望达到 $10^{-5}\text{ E}\sim 10^{-6}\text{ E}$ ^[2]。正是这一技术的突破,导致了卫星重力梯度测量进入了实用化研究阶段,推动了卫星重力梯度测量的迅速发展。

2.2 精度分析

精度分析包括各种因素对卫星重力梯度测量本身的影响,以及利用卫星重力梯度测量数据恢复全球和局部重力场所能达到的精度和分辨率。卫星重力梯度测量的精度受重力梯度仪误差、卫星轨道和姿态误差、卫星主体自引力和大气阻力等因素的综合影响,文献[3]对此作出了详细分析,并提出了相应减弱措施,在此不作详细讨论。关于利用卫星重力梯度数据恢复重力场所能达到的精度和分辨率,则主要取决于卫星轨道高度、重力梯度仪精度、卫星的寿命和数据采样间隔等因素,目前已有大量研究成果。这里要指出的是,不少文献称利用卫星重力梯度数据可恢复短波重力场,这是不确切的。原因是对重力场频域的划分,特别是中短波之间的划分尚无一致的说法,作者认为文献[4]的划分法是合理的。根据最新研究结果可看出,卫星重力梯度数据适于确定中长波重力场,特别是在改善中波段重力场方面可望作出较大贡献。一般认为最高分辨率大致为250阶(80 km),相应的重力异常和大地水准面的精度不优于5 mGal和10 cm^[3,5]。

目前精度分析的主要方法有最小二乘法、最小二乘配置法和Jekeli Rapp(1980)提出的快速误差分析方法^[6~8]。从前人的分析结果看,采用不同精度分析方法所得的结果间存在微小差异,其原因是所采用的精度分析方法和考虑的影响因子不同,也就是说现有精度分析方法均不能综合考虑各种因素的影响。同时,其精度指标仅表示所应用模型的内精度,某些系统偏差或

模型误差可能被掩盖,因此,利用卫星重力梯度数据恢复地球重力场究竟能达到什么样的精度和分辨率,尚有待于进一步研究和论证

2.3 模拟研究

因目前尚无实测卫星重力梯度数据,大部分研究结果只能以模拟的重力梯度数据为基础,因此模拟数据的精度直接影响研究成果,同时也影响今后对实测卫星重力梯度数据的处理。所谓卫星重力梯度测量的模拟,是指由现有地球重力场模型(如球谐模型、椭球谐模型、点质量模型等)模拟卫星的轨道和重力梯度观测值。现有的计算方式有两类:单点计算和格网计算。若计算点较多,则前者是一种很费时的方法,而后者采用 FFT 技术可大幅度减少计算时间。因此,可根据实际模拟的需要选择不同的计算方式。

模拟重力梯度数据的精度主要取决于现有重力场模型的精度和模拟计算方法的误差。对于前者,应尽量采用较准确的地球重力场模型,或者在模拟数据中顾及该项误差的影响;对于后者,若采用球谐模型计算,其核心问题是 Legendre 函数的一阶和二阶导数的计算误差。现有计算方法不能顾及该项误差的影响^[9],为此文献 [10] 提出了一种在模拟研究中避免 Legendre 函数导数计算的稳定高精度计算方法。关于其它的计算方法详见文献 [11, 12]

2.4 卫星重力梯度数据处理的基础理论

利用卫星重力梯度数据确定地球重力场,在解析法的框架下归结为求解卫星重力梯度边值问题。关于该问题已有若干研究结果。文献 [13] 研究了卫星重力梯度球面边值问题,其主要贡献在于引入了引力张量的不变量(三阶特征多项式系数)将 5 个独立边界条件归结为 2 个,并从理论上成功地分离了轨道摄动。由于采用球面边界,数据需要归算,理论上存在缺陷。同时,引力张量的不变量的摄动本身是个微小量,在实用上能否用来有效地分离轨道摄动,还有待于进一步深入研究。随后文献 [14] 以单一重力梯度分量(V_{zx} 、 V_{yz} 、 V_{yy})作为独立边值条件,给出了卫星重力梯度单定边值问题的定义和严密数学表述,并对其存在性和唯一性进行了论证。

当联合不同重力梯度分量确定地球重力场时,理论上便产生了卫星重力梯度超定边值问题。文献 [15] 根据拟微分算子(PDO)理论研究了重力梯度超定边值问题,随后作者又提出了应用于卫星重力梯度和航空重力梯度全球解和局部解的统一方法,包括构造统一数学模型和解的估计准则两方面。导出的解能在某种程度上最佳拟合已知边值,并具有调理性。该理论在实用方面尚需继续努力。文献 [16] 应用朱灼文教授等(1992)提出的超定边值问题的准解的一般理论,提出了卫星重力梯度超定边值问题的准解,并导出了实用解算模型,为综合利用各类重力梯度数据确定重力场展示了一种新的途径;同时还研究了超定重力-重力梯度边值问题,其准解的简洁易算的解析表达式为联合地面重力和卫星重力梯度数据精化地球重力场带来了很大便利,在理论和实用两方面均具有重要意义,是一种采用经典数学工具的解析法。进一步的研究是将该理论推广到各类重力场数据的联合处理,这就要求在带权的 Sobolev 空间中建立超定边值问题的准解理论,以便更加符合重力场确定的实际情况。

2.5 卫星重力梯度数据处理的方法

利用卫星重力梯度数据确定(或精化)地球重力场在理论上归结为求解卫星重力梯度边值问题,目前的研究主要围绕确定全球重力场模型(全球解)和局部重力场逼近(局部解)两大主题展开。在解算方法上可归纳为三类,即解析法、统计法和组合型方法。解析法(积分法)计算简单,可避免最小二乘法中的混频影响,但由于重力梯度数据不可能连续分布,因而存在积分公式离散化的误差,同时不能准确估计重力梯度数据误差对求解位系数的影响。统计法包括空域和频域中的最小二乘法和最小二乘配置法。空域最小二乘法属 Rummel, Colombo(1985)^[17]

提出的在球近似下的最小二乘迭代解法最具代表性。其主要贡献是较好地分离了卫星轨道与地球重力场的确定,通过迭代计算逐步获得准确的卫星轨道和地球重力场模型,同时采用快速球谐算法提高了计算速度。该方法不要求数据连续分布,因而容易克服两极无数数据的情况和解决卫星重力梯度测量过程中的数据间断问题,其缺点是难以反映卫星的轨道特征和顾及有色噪声的影响。Schrama(1990,1991)^[18]提出了频域最小二乘法。因基于卫星轨道摄动分析理论,因而能较准确地反映卫星的轨道特征和顾及卫星轨道误差、姿态误差及某些有色噪声的影响,适合于卫星重力梯度测量的误差分析和方案设计。但其缺点是不易处理两极地区无重力梯度数据问题和因卫星操作等原因造成的数据间断问题。不论是空域最小二乘法还是频域最小二乘法,都不能顾及信号场相关统计信息的影响,这是它们的共同弱点。

Krynsky和Schwarz(1977)研究了利用卫星重力梯度数据精化大地水准面差距的空域最小二乘配置法。其主要贡献在于确定合适的协方差函数模型,并指出只有至少含一个径向导数的重力梯度分量才能对恢复大地水准面差距有显著贡献,但没有考虑重力梯度协方差函数的非各向同性问题。其后Robbins(1985)对该方法和梯度协方差函数作了进一步讨论和完善。空域最小二乘配置法的优点是能综合利用具有不同频谱特性的场观测数据求解重力场的最佳估值,其次是在数据处理中能顾及观测量的误差和计算待估量的误差协方差矩阵。其应用上存在的最大缺点是:(a)要求有可靠的先验协方差模型,同时构造各类重力场信号协方差,以及消去趋势项和平滑高频成份需占用大量计算机空间和时间;(b)对大规模数据处理要遇到对超大型协方差矩阵求逆的困难。这两点对卫星重力梯度测量的数据归算显得尤为突出,为此,文献[3]深入研究了卫星重力梯度向下延拓的频域最小二乘配置法。该方法避免了空域配置解中对超大型协方差矩阵求逆的困难。同时因采用了FFT技术,因而可提高计算速度,节约计算机时间和空间,特别适合于大规模重力场数据的处理。该方法的有效性尚需作进一步数值验证。

组合型方法中以Wenzel(1982)提出的带有积分核的最小二乘频谱组合法为代表。吴晓平和陆仲连(1992)^[19]又将这一方法应用于卫星重力梯度的向下延拓问题。该方法的优点是能综合利用在计算点极坐标系中的某些重力梯度分量(如 $T_{z'z'}$ 、 $T_{x'z'}$)和已知的球谐位系数、地面重力异常以及大地水准面高的数据,组合谱分量解具有最小误差方差的特性,其缺点是不能考虑某些重力梯度分量(如 $T_{x'y'}$ 、 $T_{y'z'}$)的贡献。一般说来,该方法在实际计算时需要占用大量的计算机空间和时间,并且谱权的确定要以准确的先验阶方差模型为基础。此外,文献[3]提出了卫星重力梯度向下延拓的平面近似法。该方法实际上也是一种谱组合法,它能综合利用各类重力梯度数据,将平面积分和向下延拓一步完成,所有计算均采用FFT技术实现,因而可大幅度提高计算速度。同时,扰动位的功率谱估计又可分析局部重力场的谱特性。因采用球面的平面近似,重力梯度数据序列的线性卷积与Fourier变换二维循环卷积有差异,数据采样不充分和数据长度有限将导致混叠和频谱泄漏现象,这是该方法理论上存在的弱点。尽管如此,模拟试算表明,以上两种方法在卫星重力梯度局部逼近中是非常有效和实用的^[3]。

综上所述,从重力场逼近跨世纪目标出发和分析卫星重力梯度测量的研究现状,作者初步认为今后应着重在以下几个方面作进一步研究:

1)在解析法框架下发展超定边值问题的理论,如前已述及的在带权Sobolev空间中发展超定边值问题的准解理论,为联合卫星重力梯度数据、地面重力数据和GPS数据、卫星测高数据等确定地球重力场建立必要的理论基础。

2)联合各类重力场信息确定(或精化)地球重力场,在统计法框架中必须发展“非经典配置法”或随机边值问题,如近年来研究的稳健配置法等,寻求适用的新数学工具(如模糊数学、混

沌和分形)在更深层次上揭示重力场地面边界无序过程的内在本质。

3)现有的解算模型是在线性近似下得到的。由于地壳构造的复杂性和地形表面的粗糙性,重力位函数及其导数在这一边界面上显示强非线性结构。若要在 cm 级精度水平上逼近地球重力场,必须顾及非线性项的影响,或研究非线性边值问题的理论。

4)利用卫星重力梯度数据恢复地球重力场所能达到的精度和分辨率还需进一步论证,着重研究精度分析方法和精度评定准则的合理性和有效性。

5)进一步发展高效、稳定、可靠而实用的数值计算方法,以适应超大规模重力场数据处理的要求。

此外,在联合多种数据逼近重力场的研究方向上,除了在上述解析法和统计法两个领域上开拓新思路和新方法以外,还必须在两者的结合上对重力场地面边界的无序结构作深入探索。

3 应用前景展望

卫星重力梯度测量是实现重力场逼近跨世纪目标的一项新重力探测计划,这一计划的实现,将提供全球几乎均匀覆盖的高精度高分辨率重力场信息。从该计划的最终目标和前人的研究成果可以看出,卫星重力梯度测量可望对精化重力场的中波频段作出较大贡献,意味着物理大地测量向 cm 级大地水准面目标和逼近真实重力场靠近了一大步。

卫星重力梯度测量提供的大地水准面与 GPS 局部定位相结合,可提供高质量的高程信息;与卫星测高获得的实际海面结合,可以得到较准确的海面地形,从而为观测大洋环流特征提供基础;同时,卫星重力梯度测量任务还将为联系全球不同地区记录的迅速变化的海面提供参考基准,从而有助于估计与海面变化有关的全球环境问题。

此外,卫星重力梯度测量任务还将为地球物理、地球动力学和空间微重力学等的研究提供精细重力场支持。

参 考 文 献

- 1 Committee on Geodesy, Board on Earth Science and Resources Commission on Physical Sciences, Mathematics and Resources. Geodesy in the Year 2000. Washington D C National Academy Press, 1991.
- 2 Paik H J. Superconducting Sensor Gravity Gradiometer. Bulletin Geodesique, 1981(55): 370~ 381
- 3 罗志才. 利用卫星重力梯度数据确定地球重力场的理论和方法: [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1996
- 4 Schwarz K P. Data Types and Their Spectral Properties. In Proceedings of the International Summer School on Local Gravity Field Approximation. Beijing, 1984. 1~ 65
- 5 Rummel R, Sanso F. Spherical Harmonic Analysis of Satellite Gradiometry. Netherlands Geodetic Commission, 1993(39)
- 6 Colombo O L. The Global Mapping of the Gravity Field with an Orbiting Full-tensor Gradiometer: An Error Analysis IUGG. Vancouver, 1987. 250~ 266
- 7 Robbins J W. Least Squares Collocation Applied to Local Gravimetric Solutions from Satellite Gravity Gradiometry Data, Report No. 368. Columbus Ohio State University, 1985.
- 8 Jekeli C, Rapp R H. Accuracy of the Determination of Mean Anomalies and Mean Geoid Undulations from a Satellite Gravity Field Mapping Mission, Report No. 307. Columbus Ohio State University, 1980.

- 9 Koop R. Global Gravity Field Modelling Using Satellite Gravity Gradiometry. Netherlands Geodetic Commission, 1992(38)
- 10 罗志才, 宁津生, 晁定波. 卫星重力梯度分量的球谐综合. 武汉测绘科技大学学报, 1996, 21(2): 103~ 108
- 11 Thong N C. Simulation of Gradiometry Using the Spheroidal Harmonic Model of the Gravitational Field. Manuscripta Geodaetica, 1989(14): 404~ 417
- 12 Vermeer M. FGI Studies on Satellite Gravity Gradiometry, 1. Experiments with a 5-degree Buried Masses Grid Representation, Report 89. 3. Helsinki Finish Geodetic Institute, 1989
- 13 Holota P. Boundary Value Problems and Invariants of the Gravitational Tensor in Satellite Gradiometry. Lecture Notes in Earth Sciences, 1986(25): 447~ 457
- 14 Migliaccio F, Sansò F. The Boundary Value Problem Approach to the Data Reduction for a Spaceborne Gradiometer Mission. IAG 103, 1989. 67~ 77
- 15 Keller W, Hirsch M. A Boundary Value Approach to Downward Continuation. Manuscripta Geodaetica, 1994(19): 101~ 118
- 16 罗志才, 晁定波, 宁津生. 卫星重力梯度边值问题的准解. 武汉测绘科技大学学报, 1996, 21(1): 1~ 8
- 17 Rummel R, Colombo O L. Gravity Field Determination from Satellite Gradiometry. Bulletin Geodesique, 1985(57): 233~ 246
- 18 Schrama E J O. Gravity Field Error Analysis Application of Global Positioning System Receivers and Gradiometers on Low Orbiting Platforms. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(B12): 20 041~ 20 051
- 19 吴晓平, 陆仲连. 卫星重力梯度向下延拓的最佳积分核谱组合解. 测绘学报, 1992, 21(2)

The Present Situation on Satellite Gravity Gradiometry and Its Vistas in the Application of Physical Geodesy

Ning Jinsheng Luo Zhicai Chao Dingbo

(Laboratory for Modern Geodynamics, W T USM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

Abstract The background for developing satellite gravity gradiometry is discussed in this paper, and then its research situation is analyzed and remarked. Furthermore, some problems which need be studied deeply are presented. Finally, its vistas in the application of physical geodesy are prospected.

Key words satellite gravity gradiometry; physical geodesy; earth's gravity field

欢迎投稿 欢迎订阅