

卫星重力测量的应用进展

徐海军¹, 张永志¹, 段虎荣^{2,3}, 薛建华¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 3. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

摘要:介绍了 CHAMP、GRACE 和 GOCE 三颗重力卫星, 评述了卫星重力数据在恢复地球重力场模型, 测定陆地水储量变化, 研究大地水准面变化、弹性厚度、地壳厚度, 地震前后重力场的变化、地壳运动等方面的应用, 以及一系列卓有成效的研究成果, 认为卫星重力探测技术相对传统的重力测量具有得天独厚的优势, 将会有更大的应用空间。

关键词:卫星重力; 地球重力场模型; 地壳厚度; 地震; 地壳运动

中图分类号: P631.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2012)01-0054-05

卫星重力测量技术是继美国 GPS 系统成功构建后在大地测量邻域的又一项创新, 引起了测绘学、地球物理学、灾害地质学、矿产地质学等一系列学科的革命, 也是 21 世纪众多科学家关注的热点。目前, 重力卫星共有三颗。CHAMP (challenging mini-satellite payload) 是由德国波茨坦地球科学中心独立研制也是世界上首次采用卫—卫跟踪技术的重力卫星, 于 2000 年 7 月 15 日成功发射, 预期反演重力场分辨率可达 500 km, 精度将比现有重力场模型提高 1~2 个量级, 即 1 000 km 波长以上中波长大地水准面精度可达到 1 cm。GRACE (gravity recovery and climate experiment) 是美国宇航局和欧洲联合研制的重力卫星, 于 2002 年 3 月成功发射, 采用 II-SST (low low satellite-to-satellite tracking) 技术, 即同时发射相距约 200 km 的两颗低轨卫星在同一轨道上, 同时有星载设备 GPS 接收机、测量非保守力的加速度计在等待。这种技术既包含了两组高低卫—卫跟踪, 又以差分原理测定两个低轨卫星相互的运动, 因此较 CHAMP 卫星的精度有了很大提高, 预计测定中长波地球重力场, 5 000 km 波长大地水准面精度达 0.001 mm, 500 km 波长大地水准面精度可达 0.01 mm, 它将是卫星重力研究的划时代开端^[1]。GOCE (gravity field and steady-state ocean circulation explorer) 由欧空局研制, 也是第一颗载有重力梯度仪的重力卫星, 又称为重力场和静态洋流探测卫星, 于 2009 年 3 月 17 日成功发射, 具有卫星重力梯度测

量和高低卫—卫跟踪技术, 期望恢复 250 阶地球重力场和 1 cm 精度的大地水准面^[2-5]。

1 恢复地球重力场模型

国内学者在利用卫星重力数据恢复地球重力场模型方面做了不少工作, 取得了丰硕的研究成果。徐天河等^[6-7]研究了基于能量守恒方法恢复 CHAMP 重力场模型, 他利用 2002 年 1 月的 CHAMP 快速科学轨道数据和加速度计数据计算出了 50 × 50 地球重力场模型 XISM02, 将其与 EGM96、GRIM5C1、EIGEN1S、EIGEN2 模型进行了比较, 并用北极实测重力数据进行检验, 结果表明, XISM02 模型在北极地区精度与 EIGEN1S、EIGEN2 相当。肖云等^[8]研究了利用 GRACE 星间速度恢复地球重力场, 他利用 GRACE 卫星 30 天的星间速度观测值计算了一个 100 阶的地球重力场模型 DQM2006S2, 并将此模型与 EGM96、EIGEN2、CHAMP03S 和 GGM01S 模型作了比较, 结果如图 1 所示。

利用 CHAMP 或 GRACE 数据可以成功恢复地球重力场模型, 要使模型达到一定的精度, 应选择连续较长时间 (如 4 个月以上) 的卫星数据。

2 研究陆地水储量变化

在利用卫星重力数据研究陆地水储量变化方面, 国内外学者也做了很多卓有成效的工作。朱广彬^[9]采用 CPC 水文模型研究了全球的陆地水储量变

收稿日期: 2011-01-07; 修回日期: 2011-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40674001); 中央高校基本科研业务费专项资金和长安大学基础研究支持计划专项基金资助 (CHD2010ZY016); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2011JM5005)

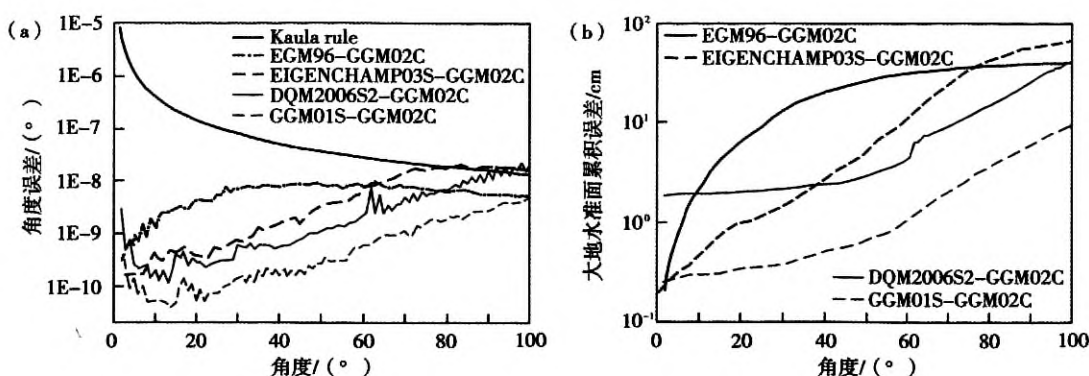
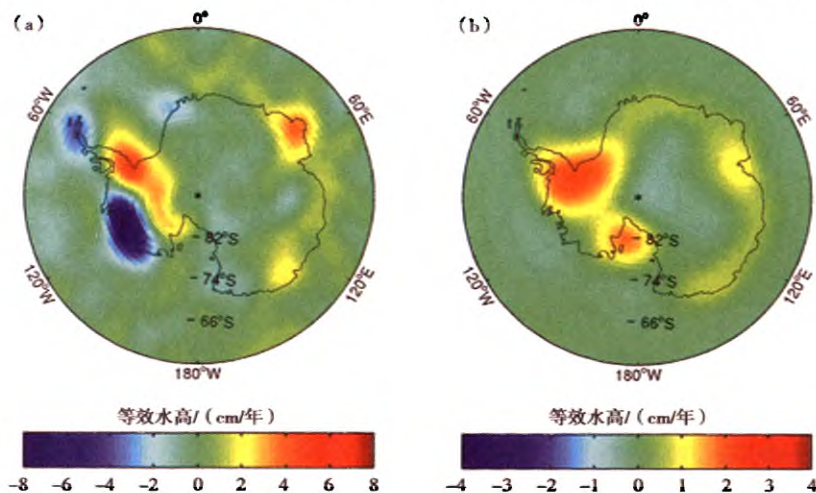


图1 各个模型与参考模型位系数的差值的阶方差(a)和大地水准面累积误差(b)(引自文献[8])

化,利用 GRACE 位模型推求了 2005 年 4 ~ 10 月的全球陆地水储量变化,并进行了对比,结果显示两种方法计算的水储量变化具有较为明显的区域性对应关系。周旭华等^[10]利用 GRACE 月尺度变化的地球重力场模型反演了全球的水储量变化,与陆地水文资料、卫星测高资料所得到的结果吻合较好。G. Ramillien 等^[11]利用 GRACE 大地水准面数据反演了陆地水资源储量对海平面的影响,对 2003 年 10 月的大地水准面精化采用原始数据等效水高的方法与采用反演的方法进行了比较,分析显示反演过

程显著削弱了噪声的影响。J. L. Chen 等^[12]利用 2003 年 1 月 ~ 2006 年 9 月共 43 个月的 GRACE 时变重力场数据研究了南极地区的冰层损失,分析了南极区的等效水高变化对冰层损失的影响,沿海区域冰块正在以每年 $(-81 \pm 17) \text{ km}^3$ 的速度消融。该结果与以前用 GRACE 数据估计的 $(-77 \pm 14) \text{ km}^3$ 基本一致(图 2),这也表明了利用 GRACE 时变重力场数据研究冰层损失的有效性。

利用 GRACE 时变重力场模型数据可以有效反演陆地水储量变化及南极地区的冰层损失,为监测



a—利用 2003 年 1 月 ~ 2006 年 9 月的 GRACE RLO4 格式的卫星重力数据估计的每年的等效水高变化,过程采用两步高斯滤波,高斯平滑半径为 300 km;b—IJ05 PGR 模型经过同样的两步高斯滤波后显示的表层质量变化;引自文献[12]

图2 南极区的等效水高变化对冰层损失的影响

并保护陆地水资源提供了一种新的技术手段。

3 研究大地水准面变化

Elena Rangelova 等^[13]利用 GRACE 和地面数据研究了北美地区长期的大地水准面变化,采用主成分分析和经验正交函数法模拟该地区的大地水准面变化,又联合地面数据和 GPS 数据,利用最小二乘配置方法再次进行了计算。结果发现,在哈德逊湾

的东南部,最小配置方法得到的结果是 1.4 mm/年 ,而仅利用 GRACE 数据得到的结果是 $1.6 \sim 1.7 \text{ mm/年}$,同时也证实了拥有更长时间跨度的地面数据联合 GRACE 数据进行反演能得到更为可靠的结果。

李飞^[14]利用 GRACE 数据研究了全球的大地水准面起伏和重力异常,大地水准面起伏和重力异常的公式为

$$N(r, \varphi, \lambda) = a_e \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n [\bar{C}_{nm}^* \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)] \bar{P}_{nm}(\sin\varphi), \quad (1)$$

$$\Delta g(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r^2} \sum_{n=1}^N (n-1) \left(\frac{a_e}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n [\bar{C}_{nm}^* \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)] \bar{P}_{nm}(\sin\varphi), \quad (2)$$

式中, r, φ, λ 分别为计算点的地心向径、地心纬度、地心经度, a_e 为地球椭圆长半径, N 为地球重力场模型展开的最高阶数, $\bar{C}_{nm}^*, \bar{S}_{nm}$ 为完全规格化的地球重力场位系数, G 是万有引力常数, M 为地球质量,

$\bar{P}_{nm}(\sin\varphi)$ 为完全规格化缔合勒让德函数, 带“*”表示地球重力场模型引力位系数减去正常椭圆对应的位系数。图3为分别利用式(1)和式(2)计算的全球大地水准面起伏和重力异常。

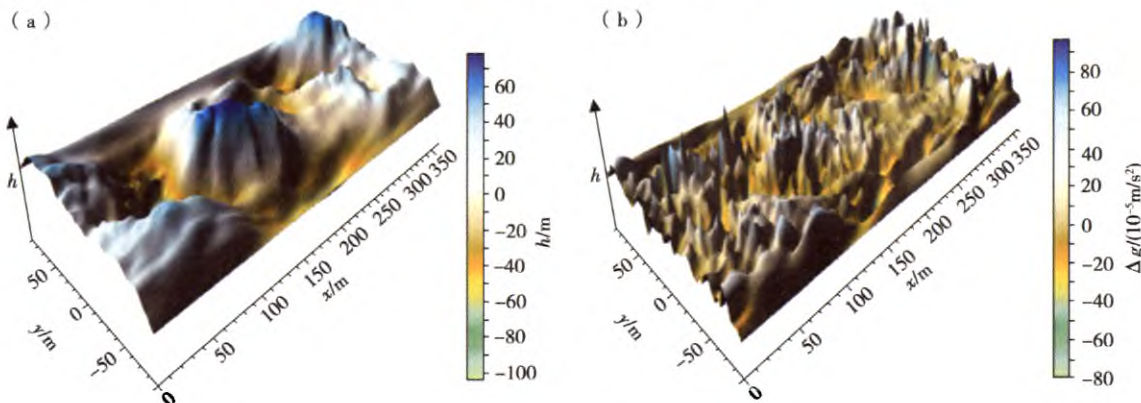


图3 60阶GCM重力场位系数大地水准面起伏(a)和重力异常(b)(引自文献[14])

GRACE卫星提供的重力场模型系数可以研究区域乃至全球的大地水准面变化,为传统的大地水准面精化工作提供了一项新的技术支持,会大幅提高工作效率并节约人力、物力成本。

4 反演板块弹性厚度和地壳厚度

Tassara A等^[15]利用GRACE卫星数据计算了南美地区的弹性厚度。他利用传统的地壳均衡分析方法中的小波理论对南美及其周边板块的GRACE

卫星数据和地形数据形成转置 T_e , 从而形成该地区的均匀重力场, 联合GRACE和CHAMP卫星得到地面和海洋重力数据。结果表明, 在太古代—太元古代南美大陆的中心厚度在 (100 ± 15) km, 而在大陆边缘地壳厚度减少到不足30 km, 证明了由于热点地区热流的相互作用, 太平洋板块已经被削弱, 揭示了地壳弹性厚度的强度结构伴随有沿俯冲带孕震区(图4)。

Tirel C等^[16]利用卫星重力数据对爱琴海的地壳厚度进行了反演, 结果显示经过地壳均衡补偿的爱琴海区域平均地壳厚度为25 km。在北爱琴海、基克拉迪群岛和克里特岛三个不同的区域可以证实此结论, 北爱琴海(地壳厚度浅于24 km)和克里特岛(地壳厚度在22~23 km之间)地壳厚度相对较浅, 而基克拉迪群岛地壳厚度约25 km, 这一结果与该地区很少发生大地震情况相一致(图5)。

段虎荣等^[17]利用GRACE数据研究了中国及邻域地壳厚度, 利用Park公式求出了中国大陆地壳厚度的分布, 重点研究了拉萨、乌鲁木齐、成都、西安、上海、北京、昆明、广州八大城市(图6), 并将研究结果与文献[18]作了对比, 差值最大地点为西安, 为+5.7 km, 最小的为广州, 为0 km, 平均差值在1~2 km之间, 从而也验证了其计算结果的准确性。利用GRACE卫星数据可以对板块弹性厚度和地壳厚度进行定量分析, 为更深入的认识地壳及地球内部提

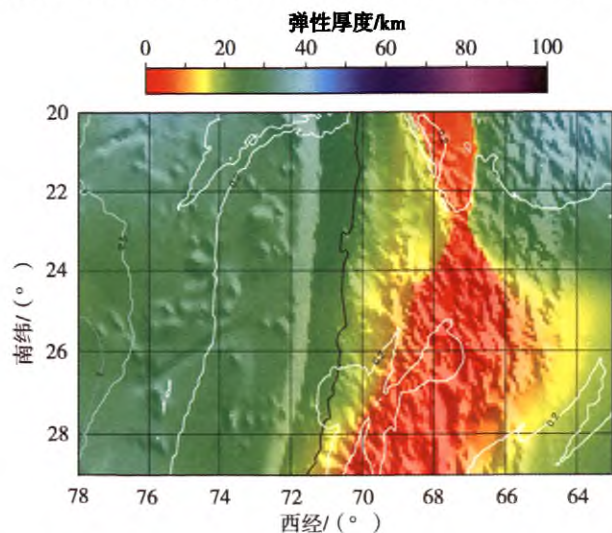


图4 利用地形数据和海洋卫星重力数据得到的安第斯山脉中央区域的地壳厚度(引自文献[15])

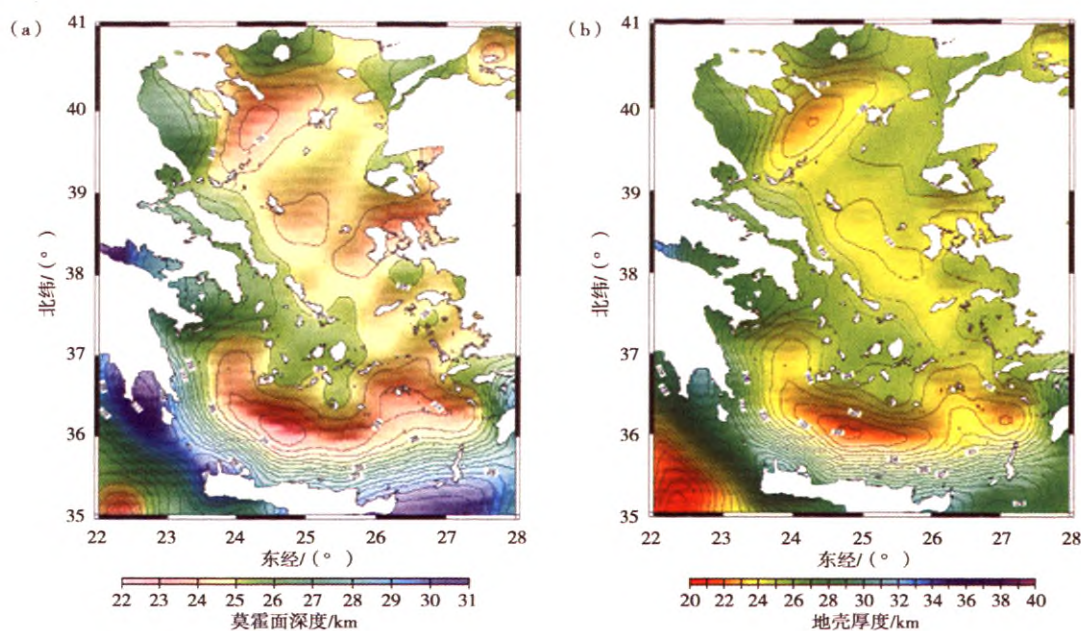


图5 爱琴海区域反演得到的莫霍面深度(a)和由莫霍面深度得到的地壳厚度(b)(引自文献[16])

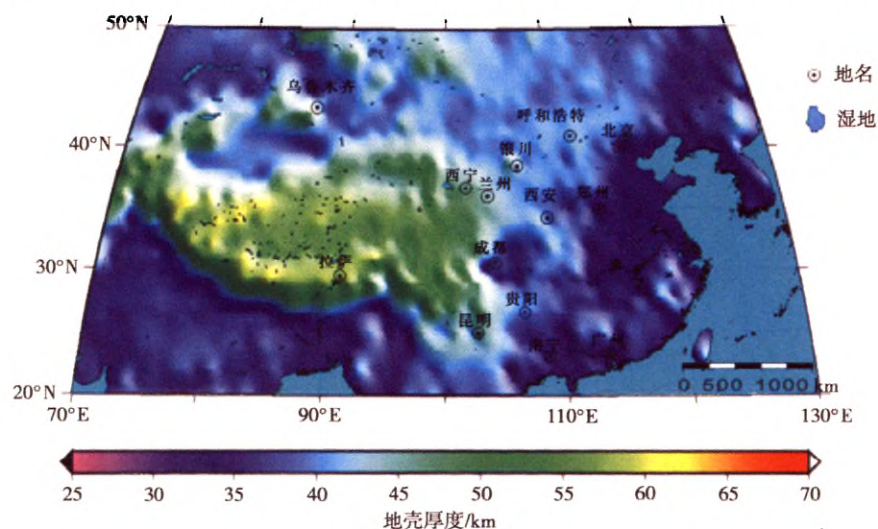


图6 中国及邻域地壳厚度分布(引自文献[17])

供了可能。

5 研究地震前后重力场变化

段虎荣等^[19]利用 GRACE 卫星数据研究了汶川地震前后重力场的变化,分析结果与实际情况相吻合。邹正波等^[20]利用 GRACE 数据研究了中国大陆及邻区的重力变化;邢乐林等^[21-22]利用位错理论,结合向上延拓技术,分别计算了汶川、苏门答腊大地震区域及的理论同震重力变化和同震形变,揭示了大地震发生的地球物理条件;费琪等^[23]研究了中国汶川、墨脱、仲巴、伽师、台湾等地区在近半个世纪以来发生的大地震,在这些地区,卫星重力场的样式有较强的相似性,震中通常位于重力场峰值间的极

陡梯度带上。

利用重力卫星数据研究地震前后重力场变化并预报地震,要求所提供的重力场模型系数应在 100 阶以上,目前重力卫星所提供的重力场模型超过 100 阶时,模型阶方差已经较大,不足以准确预报地震,但为地震预报工作提供了一种辅助手段,同时为大地震同震和震后形变监测提供了一种独特、有效的方法,无疑具有重要的科学意义,相信随着下一代重力卫星 NGGM(next-generation gravimetry mission)的发射成功,可以对地震预报工作作出应有的贡献。

6 研究地壳运动

段虎荣等^[24-25]利用 GRACE 卫星数据研究了

中国西部地壳的水平运动和垂直运动,并反演了该地区的水平运动速率和垂直运动速率,为利用重力卫星数据研究地壳运动问题作了有益的尝试,为后人从事此方面的研究工作提供了很有价值的参考。

7 结论

卫星重力测量给测绘学科、地球物理学科以及其他相关学科带来了一场空前的技术革命,为我们进一步认识地球提供了又一技术支持,GRACE 卫星有助于我们从静态重力场的研究发展到动态时变重力场。GOCE 卫星的成功发射,让我们有希望获得地球重力场更为精细的结构,极大改善对地球重力场的认识。下一代重力卫星 NGGM 的成功发射,无疑会使我们更加深入细致地了解 and 认识地球,有可能为地震预报工作带来福音。卫星重力探测技术相对传统的重力测量具有得天独厚的优势,能够覆盖地球上的重力空白区,业已在恢复地球重力场模型、测定陆地水储量变化、研究大地水准面变化、弹性厚度、地壳厚度以及地壳运动等方面得到了广泛应用,相信在以后会有更大的应用空间。

参考文献:

- [1] 徐天河. 利用 CHAMP 卫星轨道和加速度计数据推求地球重力场模型[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2004.
- [2] 罗志才,钟波,宁津生. GOCE 卫星轨道摄动的数值模拟与分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2009,34(7):757-760.
- [3] 宁津生,罗志才,陈永奇. 卫星重力梯度数据用于精化地球重力场的研究[J]. 中国工程科学,2002,4(7):23-28.
- [4] 宁津生,罗志才,晁定波. 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[J]. 武汉测绘科技大学学报,1996,21(4):309-313.
- [5] ESA. Gravity field and steady-state ocean circulation mission[R]. Report for Mission Selection of the Four Candidate Earth Explorer Mission, Noorwijk: ESA, 1999.
- [6] 徐天河,杨元喜. 基于能量守恒方法恢复 CHAMP 重力场模型[J]. 测绘学报,2005,34(1):1-6.
- [7] 徐天河,杨元喜. 利用 CHAMP 卫星几何法轨道恢复地球重力场模型[J]. 地球物理学报,2005,48(2):288-293.
- [8] 肖云,夏哲仁,王兴涛. 用 GRACE 星间速度恢复地球重力场[J]. 测绘学报,2007,36(1):19-25.
- [9] 朱广彬. 利用 GRACE 位模型研究陆地水储量的时变特征[D]. 北京:中国测绘科学研究院,2007.
- [10] 周旭华,吴斌,彭碧波,等. 全球水储量变化的 GRACE 卫星检测[J]. 地球物理学报,2006,49(6):1644-1650.
- [11] Ramillien G, Bouhours S, Lombard A. Land water storage contribution to sea level from GRACE geoid data over 2003-2006[J]. Global and Planetary Change, 2008, 60:381-392.
- [12] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D. Antarctic regional ice loss rates from GRACE[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 266:140-148.
- [13] Rangelova E, Sideris M G. Contributions of terrestrial and GRACE data to the study of the secular geoid changes in North America[J]. J Geodyn, 2008, 46:131-143.
- [14] 李飞. 利用 GRACE 数据研究大地水准面和重力异常[D]. 西安:长安大学,2008.
- [15] Tassara A, Swain C, Hackney R. Elastic thickness structure of South America estimated using wavelets and satellite-derived gravity data[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 253:17-36.
- [16] Tirel C, Gueydan F, Tiberi C. Aegean crustal thickness inferred from gravity inversion Geodynamical implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 228:267-280.
- [17] 段虎荣,张永志,刘锋,等. 利用卫星重力数据研究中国及邻域地壳厚度[J]. 地球物理学进展,2010,25(2):494-499.
- [18] 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京:中国地图出版社,1989.
- [19] 段虎荣,张永志,刘锋. 利用 GRACE 卫星数据研究汶川地震前后重力场的变化[J]. 地震研究,2009,32(3):295-298.
- [20] 邹正波,邢乐林,李辉,等. 中国大陆及邻区 GRACE 卫星重力变化研究[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(1):23-27.
- [21] 邢乐林,李辉,周新,等. GRACE 卫星重力观测在强震监测中的应用及分析[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(4):51-55.
- [22] 邢乐林,李建成,李辉,等. Sumatra-Adaman 大地震同震和震后形变的 GRACE 卫星检测[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2009,34(9):1080-1084.
- [23] 费琪. 壳幔物质流变的底辟作用孕育大地震——卫星重力资料的证据[J]. 地学前缘,2009,16(3):282-293.
- [24] 段虎荣,张永志,徐海军,等. 中国西部地壳水平运动引起的重力场空间变化特征[J]. 大地测量与地球动力学,2011,31(1):24-28.
- [25] 段虎荣,张永志,徐海军,等. 中国西部地壳垂直运动引起的重力场空间变化特征[J]. 大地测量与地球动力学,2011,31(3):25-28.

THE PROGRESS IN THE APPLICATION OF SATELLITE GRAVITY SURVEY

XU Hai-jun¹, ZHANG Yong-zhi¹, DUAN Hu-rong^{2,3}, XUE Jian-hua¹

(1. Institute of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

下转 64 页

0.024 起算。曲线 a、b 的关断延时 $t_r = 0.2 \text{ ms}$, 但 a 曲线未改正, b 曲线已改正, c 曲线则为阶跃波激发。由 3 条曲线对比可见, 改正效果令人满意。

5 结语

综上所述, ΔS_r^n 参数的优势有以下几点: ①使 S_r 曲线“一溜斜歪”、不便利用的缺点消除, 其剖面断面图、等值线断面图能很好地显示出应有的异常; ②计算简便, 是现场处理资料的实用方法; ③其效果与视电阻率一维反演相当, 并且全部单解; ④其计算式可用于磁源 TEM 的各种装置数据, 亦可用于电源 TEM 装置的数据。

文中部分数据和图件为张杰工程师计算绘制, 特此致谢。

参考文献:

- [1] Сидоров В. А. 脉冲感应电法勘探[M]. 牛之琰, 等译. 中南工业大学电磁法研究组, 1991.
- [2] 朴化荣. 瞬变电磁测深曲线视纵向电导解释法[C]//勘查地球物理勘查地球化学文集(第20集电法专辑). 北京:地质出版社, 1996.
- [3] 李貅, 全红娟, 许阿祥, 等. 瞬变电磁测深的微分电导成像[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3).
- [4] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙:中南大学出版社, 2007.
- [5] 张杰, 吕国印, 郭布领, 等. 高温超导 TEM 瞬变磁场拟二维反演及应用效果[J]. 物探与化探, 2010, 34(2).
- [6] Buselli G. Interpretation of SIROTEM Data from Elura[M]. The Geophysics of the Elura orebody, Cobar, New South Wales. D. W. Emerson, ed. 1980.
- [7] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京:地质出版社, 1998.
- [8] 苏朱利, 胡文宝. 中心回线方式瞬变电磁测深虚拟全区视电阻率和一维反演[J]. 石油物探, 2002, 41(2).

DEFINTION OF RESIDUAL LONGITUDINAL CONDUCTIVITY RATIO—— NEW DERIVED PARAMETER IN TEM AND 1D INVERSION CHARACTERS

JIANG Bang-yuan

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration CAGS, LangFang 065000, China)

Abstract: The longitudinal conductivity is one of main parameter in TEM method, but it rarely be used in base metal geophysical prospecting due to many causes. In this paper, a new deduced parameter— is defined and its algorism is proposed. Parameter is a first relative value in TEM. A lot of results of modle caculations and measured data processing are as same direct 1D inversion as apparent resistivity's. But the caculation is so easy and the solution is unique. ΔS_r^n could be used in center-near zone for in-loop and coincident loop configuration data processing.

Key words: TEM; residual longitudinal conductivity ration; relative value; 1D direct inversion

作者简介: 蒋邦远(1931-), 男, 教授级高工, 享受国务院特殊津贴, 1952 年南京大学物理系毕业, 长期从事电磁法研究。

上接 58 页

Abstract: This paper deals with three gravity satellites, namely CHAMP, GRACE and GOCE. Satellite gravity data are widely used in such fields as the recovery of the earth's gravity field, the land water storage, the study of the geoid change, the elastic thickness, the crustal thickness, the gravity variance before and after earthquake and the crustal movement. Lots of successful and valuable research results were obtained. It is considered that the satellite gravity survey technology is by for superior to traditional gravity survey and will surely have larger application space.

Key words: satellite gravity data; earth's gravity field; crustal thickness; earthquake; crustal movement

作者简介: 徐海军(1981-), 男, 长安大学在读博士生, 研究方向: 卫星重力。