

国际高精度地磁模型研究进展

黄晓颖¹, 边少锋^{1,2}

(1. 海军工程大学 导航工程系, 湖北 武汉 430033; 2. 中国科学院 测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077)

摘要: 高精度地磁模型能详尽地反映地磁场在地面上的分布, 具有较高的模型分辨率。在资源勘探、地质结构、地震火山预警、地磁导航等应用领域有重要意义。简要介绍了部分近年来国际高精度地壳磁场模型, 通过分析发现 NGDC-720 模型较以往低阶模型精度有明显改善, 并据此模型绘制了东海以及毗邻海域三分量磁异常分布, 发现该模型能与地质结构相吻合, 能给相关应用领域提供更多的信息和保障。

关键词: 地磁模型; 地磁图; 磁异常; NGDC-720

中图分类号: P318.6⁺.3

文献标识码: B

文章编号: 1671-3044(2010)03-0079-04

1 引言

地磁场是地球系统的基本物理场, 为航空、航天、航海提供天然的坐标系。地磁模型与地磁图是了解研究地磁场空间分布与时间变化规律及其场源的特征与变化的基础。

地磁场分为主磁场、岩石圈磁场、变化磁场和感应磁场四个组成部分。从全球磁场中减去主磁场, 并消除变化磁场和感应磁场, 最后得到的是残余磁场部分, 该部分磁场主要由地壳物质的磁性产生, 因此称之为地壳磁场, 又叫岩石圈磁场。通常把地核主磁场作为正常场, 而此残余部分是对正常磁场的偏离, 因此又叫异常地磁场或地磁异常。地壳磁异常的最大特点是空间结构极其复杂, 但在时间上却非常稳定^[1]。异常场模型或异常磁图中含有比大尺度主磁场更丰富的细节信息, 特征体现更为明显。

地磁场在时间和空间上是不断变化的, 所以对地磁场进行连续的、精确的测量就显得尤为重要。建立全球地壳磁场模型需要有密布全球的测点, 有人造卫星之前, 磁场建模所用的资料来自地面磁测、航空磁测和海洋磁测, 地面磁测和海洋磁测虽然精度高, 费用省、方便易行, 但速度太慢, 资料的通化处理复杂, 这些都会影响最后地磁图和地磁场模型结果的精度和可用性。人造卫星上天之后, 磁测几乎不受地形限制, 适用于大面积扫描, 弥补了上述不足, 因此, 卫星磁测成为建立磁场模型的主要途径。卫星磁测为全球磁场的高精

度快速测量提供了有力的工具。卫星在很短的时间内获得全球磁场资料, 不仅可用来建立主磁场模型, 而且可以研究全球范围的磁异常分布特点, 构建全球地壳磁场模型。

2 地磁模型表示方法

描述全球地磁场的一种方便的方法, 是将标量的磁位展开成球谐函数形式进行求解。相比较而言, 球谐分析方法能较好分离地球内部和外部磁场^[3]。为了适应导航的需求, 美、英联合研制世界地磁模型(WMM)的主要目的在于实现空间和海洋磁自主导航, 为本国和北大西洋公约组织(NATO)的导航和定向、定姿参考系统提供标准模型。90%的地球主磁场可以用国际地磁参考模型(IGRF)和世界地磁模型(WMM2005)来描述。磁位的标量表示式为:

$$U(r, \theta, \lambda) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \cdot (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \quad (1)$$

磁场分量可表示为:

$$X(\theta, \lambda) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \cdot \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta} \quad (2)$$

$$Y(\theta, \lambda) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (g_n^m \sin m\lambda - h_n^m \cos m\lambda) \cdot \frac{m}{\sin \theta} P_n^m(\cos \theta) \quad (3)$$

收稿日期: 2009-10-21; 修回日期: 2010-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(40774002, 40644020); 国家杰出青年科学基金(40125013)。

作者简介: 黄晓颖(1982-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要从事地磁匹配导航技术研究。

$$Z(\theta, \lambda) = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (n+1) (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \cdot P_n^m(\cos \theta) \quad (4)$$

式中, a 为参考圆球半径; r 为计算点与参考球心的径向距离 ($a=6371.2\text{km}$); θ 为余纬度; λ 为从格林威治起算的东经度; $P_n^m(\cos \theta)$ 为 n 阶 m 次施密特半标准化勒让德伴随函数; g_n^m 和 h_n^m 是待定的球谐系数; N 为球谐分析的截断阶数。

地核场和地壳场用施密特准归一化勒让德函数双重求和形式表示, 其中的球谐系数亦称高斯系数, 对于球谐系数的阶数 n , 一般认为对于 $1 \leq n \leq 12$ 的磁场主要来自地核; 对于 $n \geq 16$ 的磁场主要来自地壳; 当 $13 \leq n \leq 15$ 时, 地核和地壳均有贡献^[4]。

3 主要地壳磁异常的全球模型

3.1 地磁场综合模型(CM)

美国国家航空航天局(NASA)和丹麦空间研究中心(DSRI), 综合利用 POGO (1965 ~ 1970 年)、MAGSAT (1979 ~ 1980 年)、Orsted (2000 年至今)、CHAMP (2001 年至今) 的卫星数据以及地磁台站 1960 ~ 2002 年的测量数据, 运用球谐分析建立了随时空连续变化地壳磁场模型—地磁场综合模型 (comprehensive model of geomagnetic field, CM)^[5]。在 CM 模型中, CM4 地壳磁场模型的截断球谐阶数为 16 ~ 65 阶, 该模型对应的波长为 2500 ~ 615km^[6,7]。图 1(b) 是 CM4 模型给出的 400km 高度总场强异常分布。图 1(a) 给出的是 CM 第三代模型在 400km 高度上 B_r 分量异常。比较上图, CM4 更能显示磁异常的细节, 因为 CM4 采用的数据来源更广泛, 更多地利用地面数据; 其次, 其低端截断水平比 CM3 高, CM3 低端截断阶数是 15 阶。

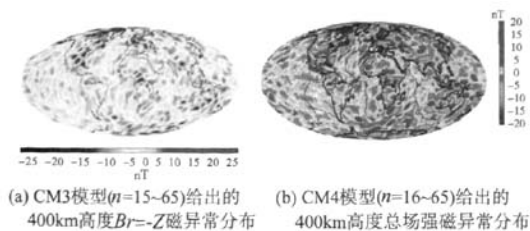


图1 两种模型的磁异常分布图

3.2 MF模型

自德国 2000 年 7 月发射 CHAMP 磁卫星以来, 德国国家地球科学研究中心(GFZ)利用 CHAMP 卫星提供的低轨道、高质量磁测数据构建了一系列岩石圈磁场模型 MF1-MF5^[8]。由于 CHAMP 飞行高度比较低, 由最初的 450km 逐渐降低到 300km, 它获

得的高质量磁测数据在卫星磁测历史上是空前的。最新的 MF6 模型是由国际空间环境研究中心(CIRES), 运用低轨道卫星 CHAMP (<350km) 近四年测得数据建立起来的第一个基于卫星的地壳磁场模型, 球谐级数展开至 120 阶, 相应的波 333 ~ 2500km, MF6 的噪声水平低, 能够可靠地向下延拓, 可获得较详尽的磁异常在地面上的分布。图 2 给出的是 MF6 模型在地面总场强分布。相比较而言, 比 CM 模型的分辨率提高了, 更多的地壳磁场细节体现出来; 再者, 该模型能够延拓至地面且幅值提高了一个数量级。该模型适用于描述地壳磁异常, 并用于推测岩石圈的组成和结构, 它也可以作为大陆异常图、全球尺度海洋异常图以及航磁异常图的长波长部分使用。MF6 模型是第一个基于卫星解决海底磁条带方向问题的磁场模型, 可以揭示海洋地壳的年龄结构。图 3 是 MF6 给出的地壳磁场垂直分量在地表分布, 附加了海底地壳年龄模型的等时线。由图中可以发现, 一些区域的海洋垂直分量磁异常与等时线的方向非常吻合^[9]。

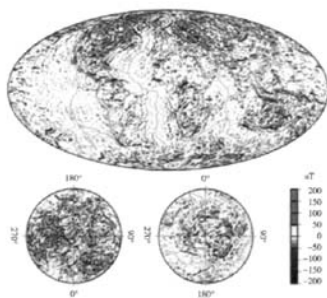


图2 MF6模型在地面总场强分布

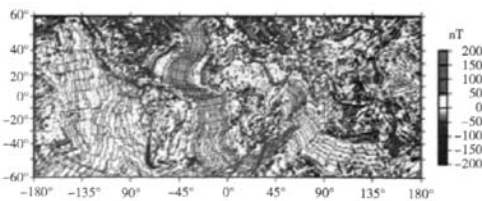


图3 MF6模型垂直分量在地表的分布

MF6 模型的建立是为高精度地壳磁场模型提供了基础。经验证, 卫星数据为局限于球谐 100 阶内的磁场长波部分, 即波长大于 400km 波长部分, 而近地面的磁测数据则提供短波长信息^[10]。2006 年 9 月, 美国地球物理数据中心综合大量航空磁测、海洋磁测和卫星磁测数据分析计算出的 16 ~ 720 阶球谐系数, 直接计算得到岩石圈磁场, 空间分辨率得到明显提高。

3.3 NGDC-720 模型

NGDC-720 模型^[11]是最新的高精度地壳磁场模型,同样是球谐阶数为 16 ~ 720 阶高斯球谐级数展开,其波长范围为 56 ~ 2500km,720 阶的截断阶数对应着 30' 的波长,15' 的模型分辨率。这种 720 阶磁场模型与本文提到的 CM4 和 MF6 模型相比较,模型分辨率得到极大的提高,这也是 NGDC-720 模型的初衷:主要为适应导航的需求,提供更高精度、更高分辨率的地磁图,从而提高应用于航空、航天、航海等的地磁导航精度。这些高精度模型同样可应用于自然资源勘探和地质构造的研究^[12]。

图 4 为 NGDC-720 模型的垂直分量 ΔZ 在地面上的全球分布情况。图中紫色区域的正异常达到 200nT,黑色区域的负异常值超过 -200nT 左右。特别是图像分辨率较以往有明显的提高。一般认为,空间分辨率随着球谐阶的增大而提高。NGDC-720 模型是将卫星磁测、海洋磁测、航空磁测的资料综合汇编而成。先将航空和海测资料综合归算到共同的网格点上,最后用最小二乘反演方法求出磁位的高阶高斯球谐系数。

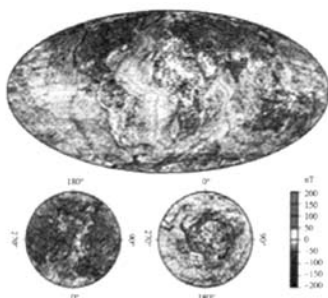


图 4 NGDC-720 模型在大地水准面上的垂直分量 ΔZ 全球分布

4 NGDC-720 模型分析

本文运用由德国国家地球科学研究中心 (GFZ)、美国国家地球物理数据中心 (NGDC) 提供的磁异常网格数据,绘制了中国东海以东海域的地磁异常三个分量在大地水准面上的等值线图,如图 5 所示,图(a)是 X 分量分布,图(b)是 Y 分量分布,图(c)是 Z 分量分布。由图可看出空间分辨率得到了明显的提高,更能体现该海域磁异常特征,反映了较小的区域内磁场的细微变化。这是 WMM2005 磁场模型所不能体现,因此,NGDC-720 是为完善地磁模型作了较大的补充,解决了以往地磁图分辨率不够的问题。

由图中可以看出地壳磁场空间分布:琉球群岛

延伸至吕宋岛磁异常变化明显,磁异常数据在 -100 ~ 160nT 之间变化,且梯度变化剧烈;在该沿线以北海域三分量变化平缓,磁异常数据在 -20 ~ 20nT 间变化,尤其是 Z 分量在该海域接近于 0,可利用效果会比较差。当某一分量值变化不明显时,可以考虑从地磁场其他六个要素中寻找变化更剧烈的地磁要素,来实现探矿找矿、考古、完善地质构造学说、地质年代等值线的研究,以及运用相关匹配算法来进行导航定位效果会更好。

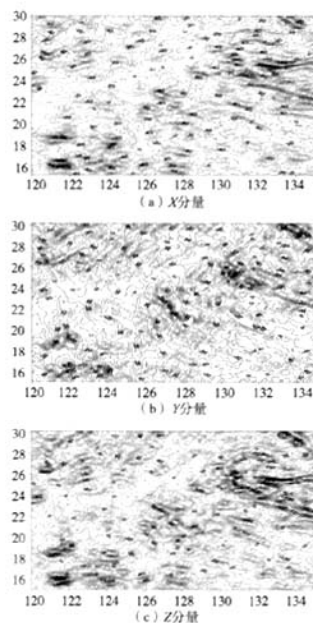


图 5 中国东海及毗邻海域的地磁异常三个分量分布

5 结束语

虽然根据实地测量形成的地磁模型更为可靠,可是基于卫星测量的高精度地壳磁场模型实用性强,不失为地磁导航前期探索研究的好方法。本文从地磁模型出发,介绍了当前高精度地磁模型 NGDC-720,并将其与较低阶地磁模型作一比较分析,发现高精度地磁场模型能为地球物理相关研究领域提供更详尽地磁信息和强有力的保障。

参考文献:

- [1] 徐文耀,白春华,康国发. 地球磁异常的全球模型[J]. 地球物理学进展,2008,23(3):641~651.
- [2] Mioara M, Michael P. Observing, modeling, and interpreting magnetic field of the solid Earth [J]. revision3_manuscript. tex, 2005.
- [3] Nils Olsen, Terence J. Sabaka. On estimating high-degree

- crustal field models using spherical harmonic transforms [J]. *Planetary Geodynamics*, 2007.
- [4] 王小多,程顺有,许小强. 塔里木盆地高分辨率卫星磁异常特征[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(1): 25 ~ 30.
- [5] Sabaka T J, Olsen N, Langel R A. A comprehensive model of the quit-time near Earth magnetic field: Phase 3 [J]. *Geophys. J. Int.*, 2002, 151: 32 ~ 68.
- [6] Bakus G E. Poloidal and toroidal field in geomagnetic field modeling[J]. *Rev. Geophys.*, 1986, 24: 75 ~ 109.
- [7] 徐文耀. 地磁场的三维巡测和综合建模[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1035 ~ 1039.
- [8] Maus S, Rother M, Hemant K, et al. Earth's lithospheric magnetic field determined to spherical harmonic degree 90 from CHAMP satellite measurements [J]. *Geophys. J. Int.*, 2006, 164: 319 ~ 330.
- [9] Maus S, Yin F, Rother M. Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite magnetic measurements [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2008, 9: Q07021, doi:10.1029/2008GC001949.
- [10] 王慧琳,陈超,张昌达. 最新的岩石圈磁场模型及中国磁异常特征的几点认识[J]. *地学前缘*, 2008, 15(3): 64 ~ 71.
- [11] NOAA/NGDC Satellite and information Service [EB/OL]. [http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geomagnetic field model at NGDC](http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geomagnetic%20field%20model%20at%20NGDC), 2007.
- [12] Fairhead M S, Hemant D, Ravat K, et al. A near-surface geomagnetic field model to spherical harmonic degree 720 [J]. *Eos Trans AGU*, 2006, 87(52): Fall Meet Suppl, Abstract GP42A-02.

The Research Evolution of International High-resolution Geomagnetic Models

HUANG Xiao-ying¹, BIAN Shao-feng^{1,2}

(1. Institute of Navigation Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei, 430033;

2. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei, 430077)

Abstract: In allusion to lithospheric magnetic field, a high-resolution geomagnetic model always exhaustively reflects the distribution of the geomagnetic field at geoid altitude, and it has a high resolution. This field is essential to resource exploration, geological structure, early-warning of earthquake and volcano, geomagnetic navigation. In this paper, some high-resolution geomagnetic models are briefly introduced. The NGDC-720 model is analyzed and compared with the low-order ones. The result shows that the NGDC-720 model has a higher precision. The author draws the three-weight anomaly maps in east-sea of China and adjacent areas with the above data. The results from the maps have more common with geological structure. Consequently, the more guarantee and communication are provided in correlative application scopes.

Key words: geomagnetic model; geomagnetic chart; magnetic anomaly; NGDC-720

(上接第66页)

Research on Ameliorative Wavelet Threshold Shrink Method to Remove Noise

CHEN Xin, FENG Qi-qiang, LI Zong-chun

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan, 450052)

Abstract: Wavelet solid threshold method is one of the effective methods to remove noise. However, the estimated signal which produces has additive surge. This paper puts forward a new method based on multinomial fit. This method puts threshold function together to get a continuous function. The experiment result shows that the new method is a good method because of reducing the phenomena of surge.

Key words: wavelet transform; multinomial fit; solid threshold

作者：[黄晓颖](#)，[边少锋](#)，[HUANG Xiao-ying](#)，[BIAN Shao-feng](#)
作者单位：[黄晓颖](#),[HUANG Xiao-ying](#)(海军工程大学, 导航工程系, 湖北, 武汉, 430033), [边少锋](#),[BIAN Shao-feng](#)(海军工程大学, 导航工程系, 湖北, 武汉, 430033;中国科学院, 测量与地球物理研究所, 湖北, 武汉, 430077)
刊名：[海洋测绘](#)[ISTIC](#)
英文刊名：[HYDROGRAPHIC SURVEYING AND CHARTING](#)
年，卷(期)：2010，30(3)
被引用次数：0次

参考文献(12条)

1. [徐文耀](#), [白春华](#), [康国发](#) [地球磁异常的全球模型](#) 2008(3)
2. [M ioara M](#), [Michael P](#) [Observing, modeling, and interpreting magnetic field of the solid Earth](#) 2005
3. [Nils Olsen](#), [Terence J. Sabaka](#) [On estimating high-degree crustal field models using spherical harmonic transforms](#) 2007
4. [王小多](#), [程顺有](#), [许小强](#) [塔里木盆地高分辨率卫星磁异常特征](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2008(1)
5. [Sabaka T J](#), [Olsen N](#), [Langel R A](#) [A comprehensive model of the quit-time near Earth magnetic field:Phase 3](#) 2002
6. [Bakus G E](#) [Poloidal and toroidal field in geomagnetic field modeling](#) 1986
7. [徐文耀](#) [地磁场的三维巡测和综合建模](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2007(4)
8. [Maus S](#), [Rother M](#), [Hemant K](#) [Earth's lithospheric magnetic field determined to spherical harmonic degree 90 from CHAMP satellite measurements](#) 2006
9. [Maus S](#), [Yin F](#), [Rother M](#) [Resolution of direction of oceanic magnetic lineations by the sixth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite magnetic measurements](#) 2008
10. [王慧琳](#), [陈超](#), [张昌达](#) [最新的岩石圈磁场模型及中国磁异常特征的几点认识](#)[期刊论文]-[地学前缘](#) 2008(3)
11. [NOAA/NGDC Satellite and information Service](#) 2007
12. [Fairhead M S](#), [Hemant D](#), [Ravat K](#) [A near-surface geomagnetic field model to spherical harmonic degree 720](#) 2006(52)

相似文献(2条)

1. 期刊论文 [杨云涛](#), [石志勇](#), [关贞珍](#), [李豫泽](#), [YANG Yun-tao](#), [SHI Zhi-yong](#), [GUAN Zhen-zhen](#), [LI Yu-ze](#) [一种改善区域地磁场模型边界效应的方法](#) -[地球物理学进展](#)2009, 24(2)

针对目前建立区域地磁场模型截断阶数受限, 地磁图精度偏低等缺陷, 研究了运用Taylor多项式拟合法建立区域地磁场模型所存在的边界效应问题, 从理论上深入分析了产生边界效应误差的根源, 提出了采用边界插值约束的Taylor多项式拟合法, 在改善区域地磁模型边界效应的同时, 提高了模型拟合的截断阶数, 进而绘制出较高精度的区域地磁图, 同时对该技术和现有补充国际地磁参考场值方法进行了比较分析, 最后进行了仿真试验. 试验证明, 该技术具有优于补充国际地磁参考值的方法, 能克服现有区域地磁场模型的边界效应问题, 提高了区域地磁场模型的拟合精度.

2. 期刊论文 [徐文耀](#), [XU Wen-Yao](#) [地磁场的三维巡测和综合建模](#) -[地球物理学进展](#)2007, 22(4)

在1967~1971年期间, 美国POGO系列卫星进行了地磁场总强度测量, 接着, 1979~1980年MAGSAT地磁卫星进行了真正意义上的三分量测量. 自此之后, 卫星磁测沉静了20年. 近年来, 这一领域又重新进入高潮, 其标志是1999年2月丹麦发射Orsted磁测卫星, 2000年7月德国发射CHAMP磁测卫星, 2000年11月阿根廷/美国合作发射SAC-C卫星. 这一时期的磁测卫星还有南非和澳大利亚的卫星, 而欧空局计划在2009年发射三颗磁测卫星Swarm, 中国的地磁卫星也在积极筹备之中. 在这20多年的“沉静”中, 各国地磁学家潜心研究的结果把POGOMAGSAT和Orsted-Champ-SAC两代磁测卫星和地面磁测连接在一起, 催生了新型地磁场模型和地磁图—“地磁场综合模型”(comprehensive model of geomagnetic field, 简称CM). 如果说过去的地磁场模型只是对主磁场的形态描述, 那么, 新一代模型不仅包括地核主磁场模型, 而且包括岩石圈磁场模型、电离层磁场模型、磁层磁场模型、内部感应磁场模型以及空间环型磁场模型, 力求在更广的范围内, 以更深入的物理内涵和更高的精度表述地球磁场的全貌. 本文在评述CM模型的基础上, 提出下一代地磁模型的设想, 讨论地球磁场三维巡测和综合建模的未来发展趋势和关键问题.

