

DOI: 10.13203/j.whugis20130124

文章编号: 1671-8860(2014)08-0923-07

# 世界地磁场模型 WMM2010 与台站年均值对比

常宜峰<sup>1</sup> 柴洪洲<sup>1</sup> 明 锋<sup>1</sup> 谢 恺<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450052

**摘要:** 研究了由多种卫星磁场观测数据建立的最新的世界地磁场模型 WMM2010 与地面台站观测值之间的关系,并将常用的国际参考地磁场模型 IGRF11 作为对比参照。首先分析了 IGRF11 与台站观测值的对比关系,验证了 IGRF 模型的精度和可靠性。其次分析了 WMM2010 与 IGRF11 模型的差异,引入绝对误差、均方根误差、相对误差和权重系数等指标来进行评价,分析表明,WMM2010 模型在研究地磁异常场时的正常场改正和改善边界效应时填补空白区域中更具参考价值。

**关键词:** 卫星地磁测量; WMM2010; IGRF11; 台站; 模型

中图法分类号:P228

文献标志码:A

地磁场是一个随时间和空间变化的基本物理场,由不同的场源可分为地核场、地壳场和扰动场。地磁异常场对研究地壳构造与分布和地磁导航应用等具有重要价值<sup>[1-3]</sup>,地磁异常场确定的准确与否与正常场的选择具有直接关系。通常情况下,将国际地磁参考场 IGRF 模型作为正常场,IGRF 的误差来源主要有球谐级数截断阶数、台站的数目及分布均匀情况、地壳磁异常分布情况和外源场影响等。然而,IGRF 模型只使用了我国少数几个台站年均值,很难反映我国地磁场的某些区域性特征<sup>[4]</sup>。分析 IGRF 在我国大陆地区的误差,有利于更合理地利用 IGRF 资料。通常情况下,作为标准主磁场的 IGRF 模型用球谐分析的方法来描述地球主磁场和长期变化<sup>[5]</sup>,由国际地磁与高空物理联合会(IAGA)每 5 年更新一次,目前 IGRF 模型的最新版本为 2009 年发布的第 11 代 IGRF 模型(IGRF11),可以计算 1990.0 ~ 2020.0 年间地磁场的 7 分量值以及年变化率。

人造卫星发射以来,人们可以获得全球范围均匀分布的磁场观测数据,这为进一步研究地磁场空间分布规律创造了可能条件,并由此构建了一系列的卫星地磁场模型<sup>[6-8]</sup>,主要包括由多颗卫星和地面磁场观测数据构建的综合地磁场模型和由不同时间段单颗卫星数据建立的地磁场模型两种类型<sup>[9]</sup>。这些卫星地磁场模型为研究中国地

区地磁场和地磁异常场及其变化提供了新的资料。基于此,本文研究了最新的卫星地磁场模型 WMM2010 在中国的适用情况,为主磁场的选取和空间背景场的构建提供更精确的参考依据。

## 1 WMM2010 模型简介

世界地磁场模型 WMM2010 (World Magnetic Model 2010)是由美国国家地球物理数据中心(NGDC)和英国地质调查局(BGS)共同研制的最新模型<sup>[10]</sup>,所使用的数据主要是卫星磁场测量(1999~2009 年 20 s 采样率的 CHAMP 和 Orsted 地磁卫星观测数据)和地面磁场测量两种,适用区间为 2010.0~2015.0 年。WMM2010 模型主要描述了主磁场成分,同时也顾及到长波长的地壳和海洋磁场部分,主要为满足英国、美国国防部和北约等军事部门导航定向需求而研制,在民用导航定位系统中也有广泛的应用<sup>[10-11]</sup>。

主磁场  $B_m$  是磁位势  $V$  的负梯度:

$$B_m(\lambda, \varphi', r, t) = -\nabla V(\lambda, \varphi', r, t) \quad (1)$$

式中,磁位势  $V$  为:

$$V(\lambda, \varphi', r, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left[ \begin{array}{l} g_n^m(t) \cos m\lambda + \\ h_n^m(t) \sin m\lambda \end{array} \right] \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} \tilde{P}_n^m(\sin \varphi') \quad (2)$$

收稿日期: 2013-05-13

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(41274045)。

第一作者: 常宜峰,博士生,主要从事物理大地测量数据处理及地磁场模型研究。E-mail: changyifeng1986@163.com

式中,  $(\lambda, \varphi', r)$  表示经度、余纬和极距;  $a$  为地球半径;  $g_n^m(t)$  和  $h_n^m(t)$  是与时间相关的高斯系数;  $\check{P}_n^m(\cdot)$  为施密特半标准化勒让德函数, 如式(3):

$$\begin{cases} \check{P}_n^m(\cdot) = \sqrt{\frac{2(n-m)!}{(n+m)!}} P_{n,m}(\cdot), & m > 0 \\ \check{P}_n^m(\cdot) = P_{n,m}(\cdot), & m = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由此, 可求得地磁场各分量相应的模型值。由于卫星磁场测量数据的加入使得 WMM 模型精度较以往有显著提高。模型精度满足美国军方提出的 MIL-W-89500 标准<sup>[10]</sup>, 即全球测站和模型差值通化到相应海平面处的均方根误差要满足磁偏角和磁倾角  $|D|, |I| \leq 1^\circ$ ,  $X$  和  $Y$  分量  $|X|, |Y| \leq 140$  nT,  $H$  和  $Z$  分量  $|H|, |Z| \leq 200$  nT,  $F$  分量  $|F| \leq 280$  nT。

为验证最新的 IGRF11 模型与地面台站之间的一致性, 并进一步比较 WMM2010 与 IGRF11 模型在中国地区的适用性差异, 本文主要进行以下两方面的实验。首先, 利用 1990~2011 年的台站和模型数据计算了各个台站的差值和均方根误差来检验 IGRF11 模型误差水平及其在我国的整体精度和适用性; 其次, 利用 2011 年的台站和两个模型数据, 计算了各台站处的绝对误差、均方根误差、相对误差和权重系数等相关评价指标, 检验 WMM2010 与 IGRF11 的差异。

## 2 算例及分析

### 2.1 实验数据

选择成都、长春、武汉等 14 个地磁台站 1990~2011 年地磁场 7 要素的年均值观测数据, 将磁偏角  $D$  和磁倾角  $I$  以分为单位统一转化(约定  $D$  东向为正,  $I$  向下为正), 考虑了在此期间台站迁址和仪器误差等的影响并做了相应处理(武汉台站 1998 年迁址, 1999 年后  $D$  减小  $0.2'$ ,  $H$  增大  $13$  nT,  $Z$  增大  $55$  nT; 成都台站 2003 年后  $D$  减小  $4.9$  nT,  $H$  增大  $3$  nT)。

同时, 计算了相应测站位置处的 IGRF11 和 WMM2010 模型值。使用英国地质调查局网站(British Geological Survey)提供的在线计算 IGRF11 模型工具, 分别输入对应地面台站的地理经纬度、海拔高度和时间, 依次计算了 1990.5~2011.5 相应台站的年均值数据。由于 WMM2010 模型的适用范围为 2010.0~2015.0, 所以只选择计算了 2011.5 年各台站位置处 WMM2010 的模型值, 来比较两个模型的差异。

### 2.2 IGRF11 模型与地面台站关系分析

选择 1990~2011 年有连续观测的 6 个台站的年均值数据, 计算了台站观测值和 IGRF11 模型值的差值以及  $D, H, Z$  三要素的差值随时间的变化关系。为更进一步量化计算结果, 将各要素的平均值和均方根误差结果列于表 1 和表 2。

图 1 为地磁台站  $D, H, Z$  三要素的观测值与 IGRF11 模型的差值关系曲线图, 其中横坐标表示年份, 纵坐标表示  $D, H, Z$  三要素的变化量, 6 个台站自上而下按照纬度从高到低的顺序列为 6 行, 第一列表示磁偏角  $D$  差值的变化, 第二列表示水平分量  $H$  差值的变化, 第三列表示垂直分量  $Z$  差值的变化, 结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 1990~2012 年间, 磁偏角  $D$  差值曲线除高纬度的满洲里和长春站呈上升趋势外, 其余台站均是下降趋势, 这表明除满洲里和长春两个台站外, 其余台站观测值的年变率  $SV_{\text{观测}}$  要小于 IGRF 模型的年变率  $SV_{\text{模型}}$ 。磁倾角  $I$  差值曲线整体变化趋势较为平缓, 呈现比较明显的波动性, 1991 年和 2000 年出现了最高点, 1996 年和 2008 年出现最低点。水平分量  $H$  除长春台站外均呈上升趋势, 并具有两个比较明显的向上突起, 在 2002 年和 2008 年达到最大值。台站观测值与 IGRF 模型年变率不同, 表明长期变化存在速度的差异。同时,  $H$  和  $Z$  的起伏分布特点反映了地磁场长期变化的非线性特性。

为进一步比较台站观测值和 IGRF 模型的关系, 计算了 1990~2011 年间台站观测值与 IGRF11 模型值差值的平均值和均方根误差。如表 1 所示, 纵向显示为台站名称, 表示不同台站观测值, 横向分别表示地磁场 7 要素差值的平均值。

从表 1 中可以看出, 相同要素不同台站间差别很大:  $\Delta D$  变化范围为  $-8.61' \sim 2.50'$ ,  $\Delta I$  的范围为  $-12.46' \sim 7.95'$ ,  $\Delta H$  的范围为  $-25.11 \sim 166.60$  nT,  $\Delta X$  的范围为  $-27.28 \sim 161.78$  nT,  $\Delta Y$  的范围为  $-75.99 \sim -10.35$  nT,  $\Delta Z$  的范围为  $-209.29 \sim 323.94$  nT,  $\Delta F$  的范围为  $-131.09 \sim 362.62$  nT。针对同一地磁要素, 不同台站间的实测值和模型值的差值相差较大。经过分析可知模型和台站间观测值差异产生的原因如下: 一方面来自模型的描述能力, 即数学方法球谐函数模型本身的误差; 第二方面来源于不同地区的岩石磁场差异, 即台站位置不同地壳物质分布不均引起的磁异常; 第三方面来自外源磁场部分, 即空间磁场的影响。

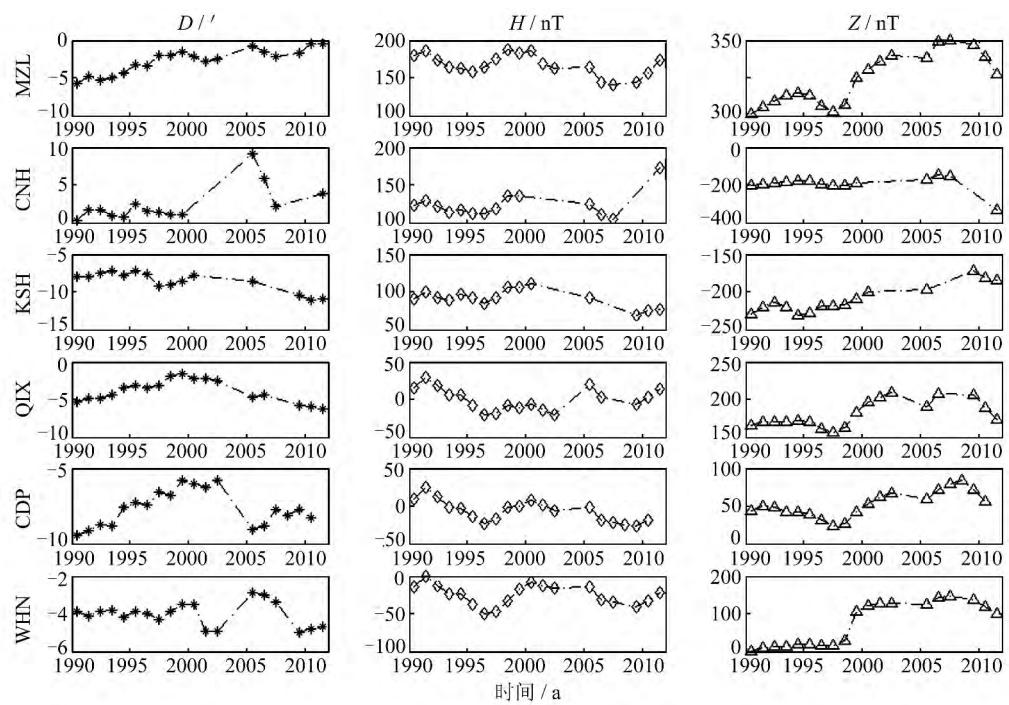


图1 IGRF11模型与台站观测值差值  
Fig. 1 The Error of IGRF11 and Observatories

从表2可以看出,不同台站的 $\Delta H$ (11.29~16.18 nT)、 $\Delta X$ (10.81~17.05 nT)、 $\Delta Y$ (4.83~13.17 nT)、 $\Delta Z$ (16.35~55.72 nT)和 $\Delta F$ (12.00~41.61 nT)要素的中误差大都在40 nT以内变化, $\Delta D$ (0.61°~2.30°)和 $\Delta I$ (1.40°~3.49°)要素的中误差平均值分别为1.38°和2.08°。总体看来,各个台站的均方根误差波动相对不太明显,一

般认为IGRF模型的误差是在50~100 nT<sup>[12-13]</sup>。按照此标准,说明IGRF11模型计算值和地面台站观测值具有比较好的对应性。各个台站不同地磁要素观测值和模型值差值的均方根误差都低于IGRF11模型的误差水平,表明IGRF11模型可以较好反映地磁台站年均值的变化情况。

表1 IGRF11模型与台站观测值差值的平均值

Tab. 1 The Mean Values of IGRF11 and Observatories

台站	$\Delta D/^\circ$	$\Delta I/^\circ$	$\Delta H/nT$	$\Delta X/nT$	$\Delta Y/nT$	$\Delta Z/nT$	$\Delta F/nT$
MZL	-2.79	-1.74	166.60	161.78	-42.71	323.94	362.62
CHN	2.50	-12.46	124.34	124.51	-10.35	-192.04	-108.71
KSH	-8.61	-11.51	91.46	95.55	-62.24	-209.29	-131.09
QIX	-3.91	7.95	0.25	-1.45	-37.10	181.23	143.24
CDP	-7.64	3.50	-6.22	-8.10	-75.99	52.37	34.02
WHN	-4.03	5.38	-25.11	-27.28	-38.72	73.31	35.29
平均	-4.08	-1.48	58.55	57.50	-44.52	38.26	55.90

表2 IGRF11模型与台站观测值差值的均方根误差

Tab. 2 The Mean Square Root Error of IGRF11 and Observatories

台站	$\Delta D/^\circ$	$\Delta I/^\circ$	$\Delta H/nT$	$\Delta X/nT$	$\Delta Y/nT$	$\Delta Z/nT$	$\Delta F/nT$
MZL	1.57	1.40	13.90	13.50	9.81	16.35	12.16
CHN	2.30	1.47	16.18	17.05	6.39	41.65	30.02
KSH	1.22	2.25	11.29	10.81	9.21	17.64	12.00
QIX	1.43	1.56	14.44	13.87	13.17	17.08	15.22
CDP	1.14	2.30	13.87	13.89	11.51	16.61	12.97
WHN	0.61	3.49	13.09	13.22	4.83	55.72	41.61
平均	1.38	2.08	13.79	13.72	9.15	27.51	20.66

### 2.3 WMM2010 和 IGRF11 模型比较

为了进一步研究 WMM2010 模型与 IGRF11 模型的差异, 分别计算了在 2011.5 年各个台站在位置处地磁 7 要素的 WMM2010 和 IGRF11 模型值。

#### 2.3.1 模型的绝对误差比较

首先, 比较了各个台站的观测值和相应两个模型计算值之差, 即绝对误差, 结果如图 2 所示。横坐标表示台站名称(按照台站纬度从大到小的顺序排列), 纵坐标表示绝对误差的大小, 实心柱状图表示 WMM2010 模型计算结果, 空心柱状图表示 IGRF11 模型计算结果, 绝对误差大于 0 表示模型值大于台站观测值, 绝对误差小于 0 表示模型值小于台站观测值。

由图 2 可知, 模型计算值和台站实测值的差值在 0 附近上下波动。北京站的  $D$ 、 $H$ 、 $X$ 、 $Y$  值明显

大于其余台站, 除去北京站, 其余台站范围为  $|D| \leq 0.2^\circ$ ,  $|H|, |X| \leq 200$  nT,  $|Y| \leq 100$  nT,  $|I| \leq 0.3^\circ$ ,  $|Z| \leq 300$  nT,  $|F| \leq 300$  nT。 $X$  和  $H$  小于 0 的有北京和成都站,  $Z$  和  $F$  小于 0 的有北京、长春、喀什和通海站,  $D$  和  $Y$  小于 0 的有成都、喀什、乾陵和武汉站,  $I$  小于 0 的有长春、喀什、泉州和通海站。同时, 可以看出差值与纬度的关系, 普遍高纬度地区的差值要普遍大于低纬度地区。

由图 2 进一步可得, 大部分的 WMM2010 模型值小于 IGRF11。 $D$  和  $Y$  的 WMM2010 值均小于或相当于 IGRF11 模型值。个别的 WMM2010 大于 IGRF11 模型值的情况有,  $X, H, I$  要素有北京、成都和琼州站,  $Z, F$  要素有通海、武汉和成都站。因此, WMM2010 模型整体上优于 IGRF11 模型, 在研究我国西部和海洋等广大困难区域时, 使用 WMM2010 作为参考模型更具有代表性。

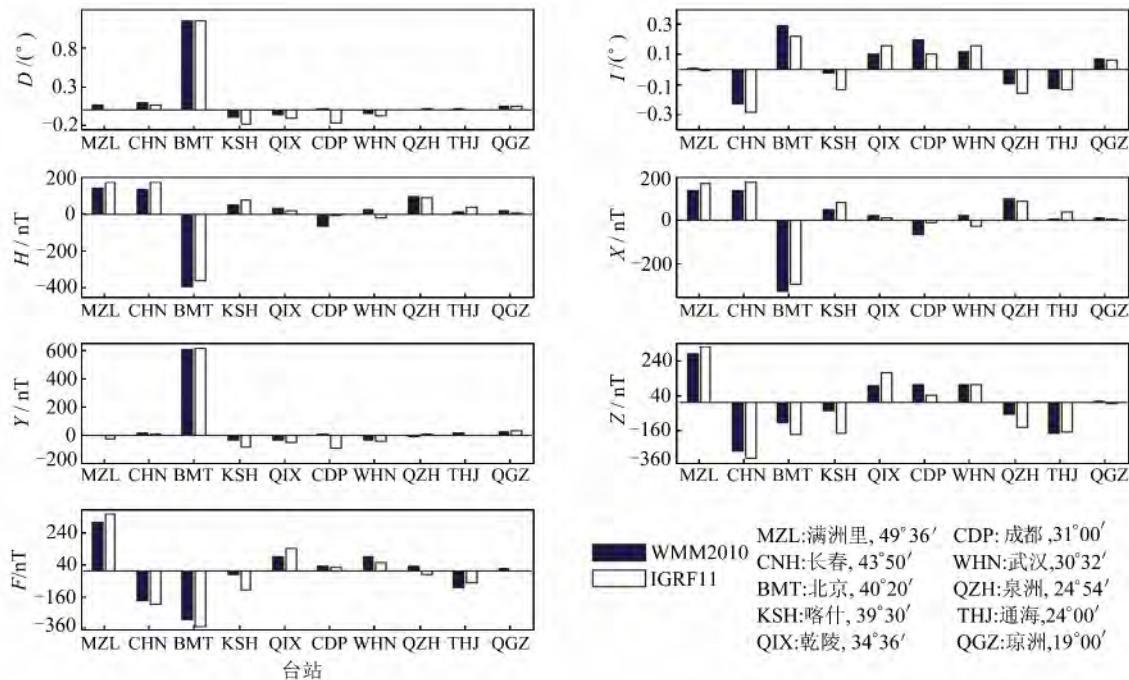


图 2 WMM2010 和 IGRF11 模型值与台站实测值绝对误差比较  
Fig. 2 The Absolute Error of WMM2010 and IGRF11 with Observatories

#### 2.3.2 模型的均方根误差比较

为了研究两模型在我国范围内的平均误差, 分别计算两模型 7 个地磁要素的均方根误差:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中,  $B_i$  和  $O_i$  分别表示模型计算值和台站的观测值;  $n$  为测站个数。

由式(4)计算了 10 个台站地磁场 7 个要素的均方误差, 计算结果如表 3 所示。由表 3 可以看

出,  $D, I, X$  和  $Y$  要素的均方根误差大小相当,  $D$  和  $I$  相差  $0.01^\circ$ ,  $X$  相差  $-0.97$  nT,  $Y$  相差  $0.36$  nT。WMM2010 模型  $Z, H$  和  $F$  要素的均方根误差明显优于 IGRF11 模型,  $Z$  相差  $6.34$  nT,  $H$  相差  $38.03$  nT,  $F$  相差  $25.61$  nT。

#### 2.3.3 模型的相对误差和权重系数比较

为了比较各台站之间误差的相对关系, 进一步使用相对误差来分析各个台站值和模型值。某一要素的相对误差  $\Delta' B_i$ , 用其模型值  $B_i$  与相应台站值  $O_i$  之差除以台站值  $O_i$  来表示, 即各个台站的绝

表3 WMM2010和IGRF11模型与地面台站的均方根误差

Tab. 3 The Mean Square Root Error of WMM2010 and IGRF11 with Observatories

模型名称	D/(°)	I/(°)	X/nT	Y/nT	Z/nT	H/nT	F/nT
WMM2010	0.36	0.15	145.39	127.01	192.41	157.14	160.43
IGRF11	0.37	0.16	144.42	127.37	198.75	195.17	186.04

对误差与台站值的比值:

$$\Delta' B_i = \frac{B_i - O_i}{O_i} \quad (5)$$

式中,  $B_i$  为某一地磁要素的模型计算值;  $O_i$  为对应台站该地磁要素的观测值。

由于相同地磁台站的各个地磁要素误差大小和分布是不同的, 单个地磁要素的误差不能完全准确地描述与地磁台站值的误差关系。计算权重系数  $P$ :

$$P = \sum_{i=1}^3 \Delta' B_i \cdot \frac{B_i}{B} \quad (6)$$

式中,  $B_i$  依次表示地磁场  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个要素;  $B$  表示地磁总强度;  $\Delta' B_i$  表示三个要素的相对误差。

$P$  值的大小表明了台站观测值的整体误差的大小, 整体观测误差越大, 则  $P$  越大, 反之, 则越小。将所计算各个台站的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三要素的结果列于表 4。

表4 WMM2010和IGRF11模型与地面台站的相对误差和权系数

Tab. 4 The Relative Error and Weight Coefficient of WMM2010 and IGRF11 with Observatories

台站名称	WMM2010				IGRF11			
	$\Delta' X/\%$	$\Delta' Y/\%$	$\Delta' Z/\%$	$P/10^{-4}$	$\Delta' X/\%$	$\Delta' Y/\%$	$\Delta' Z/\%$	$P/10^{-4}$
BMT	-1.15	-15.93	-0.25	190.66	-1.04	-16.08	-0.40	198.29
CDP	-0.19	-0.59	0.27	33.96	-0.03	9.42	0.11	28.86
CNH	0.54	-0.32	-0.59	79.78	0.69	-0.02	-0.68	92.68
KSH	0.19	-1.96	-0.11	25.62	0.31	-4.61	-0.40	66.07
MZL	0.66	0.03	0.52	72.29	0.80	0.85	0.60	90.43
QGZ	0.04	-2.09	0.04	10.07	0.02	-2.86	-0.05	10.05
QIX	0.08	2.10	0.24	30.50	0.03	3.29	0.42	46.27
QZH	0.27	0.44	-0.26	39.29	0.24	-0.31	-0.55	53.49
THJ	0.02	-1.29	-0.67	43.66	0.10	0.12	-0.64	46.04
WHN	0.07	1.54	0.30	33.45	-0.07	1.82	0.28	33.83

由表 4 可以看出, 不同台站的三要素相对误差值变化范围有大有小。WMM2010 模型  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  变化范围为  $-1.15\% \sim 0.66\%$ 、 $-15.93\% \sim 2.10\%$  和  $-0.67\% \sim 0.52\%$ ; IGRF11 模型为  $-1.04\% \sim 0.80\%$ 、 $-16.08\% \sim 9.42\%$  和  $-0.68\% \sim 0.60\%$ 。WMM2010 的变化范围基本与 IGRF11 保持一致, 但波动范围又明显有所收敛。其中  $Y$  要素相差最大, WMM2010 相对误差最大值为  $2.1\%$ , IGRF11 为  $9.42\%$ , 两者差异主要表现了台站所在位置处岩石圈地壳磁异常的差异。因为综合利用地面和卫星磁测数据构建的 WMM2010 模型和地磁台站观测数据都较好地描述了内源场部分, 而 IGRF11 模型主要描述的只是主磁场部分, 所以 WMM2010 与地磁台站的相对误差主要代表了卫星磁场模型和台站观测精度的差异, IGRF11 的相对误差除包含观测精度差异外, 还有地壳磁异常差异。

### 3 结语

1) 相同地磁要素不同台站观测值与 IGRF11 模型差值的平均值波动比较大, 反映出台站位置地壳物质分布不均引起的磁异常; 相同台站不同地磁分量的台站观测值与 IGRF11 模型值之差的均方根误差明显低于 IGRF 模型误差水平, 表明 IGRF11 模型可以较好地反映地磁台站观测值的变化情况。

2) 两地磁场模型与台站观测值的绝对误差围绕在 0 附近上下波动, WMM2010 模型大多数地磁要素绝对误差要小于 IGRF11 模型或者基本相当, 但并非全部都优于后者; 两个模型  $D$ 、 $I$ 、 $X$  和  $Y$  要素的均方根误差基本相当; 对  $Z$ 、 $H$  和  $F$  要素而言, 则 WMM2010 明显优于 IGRF11。

3) 相同地磁要素不同台站间相对误差变化范围不同, WMM2010 相对误差变化主要反映了地磁场模型与测站精度的差异, IGRF11 相对误差主要反映了测站位置地壳磁异常场分布情况。因此

WMM2010 模型在用于研究我国局域地磁场模型时进行正常场改正,以及填补缺少台站的空白区域来改善中国地磁场模型的边界效应时具有重要的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao Jianhu, Zhang Hongmei, Wang Aixue, et al. Underwater Geomagnetic Navigation Based on ICCP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(3): 261-264(赵建虎,张红梅,王爱学,等. 利用 ICCP 的水下地磁匹配导航算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010,35(3): 261-264)
- [2] Feng Yan, An Zhenchang, Sun Han, et al. A Study on Model of Geomagnetic Normal Field of China Region[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(7): 723-729(冯彦,安振昌,孙涵,等. 中国地区地磁正常场模型研究[J]. 地球科学进展, 2010, 25(7): 723-729)
- [3] Tan Bin, Lin Chunsheng, Zhang Ning, et al. Impacts of Geomagnetic Gradient on Solving Precision of Aircraft Magnetic Field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 36(12): 1 482-1 485(谭斌,林春生,张宁,等. 地磁场梯度对飞机磁场求解精度的影响分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 36(12): 1 482-1 485)
- [4] An Zhenchang. Regional and Global Geomagnetic Field Models[J]. *Progress in Geophysics*, 1995, 10(3): 63-73(安振昌. 区域和全球地磁场模型[J]. 地球物理学进展, 1995,10(3):63-73)
- [5] Kang Guofa, Gao Guoming, Bai Chunhua, et al. Characteristics of the Secular Variation and Secular Acceleration Distributions of the Main Geomagnetic Field for the CHAMP Satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(8): 1 976-1 984(康国发,高国明,白春华,等. CHAMP 卫星主磁场长期变化和长期加速度的分布特征[J]. 地球物理学报, 2009, 52(8): 1 976-1 984)
- [6] Zhang Changda. The Past, Present and Future of the Satellite Magnetic Survey[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2003, 27(5): 329-332(张昌达. 卫星磁测的过去现在未来[J]. 物探与化探, 2003, 27(5): 329-332)
- [7] Feng Yan, An Zhenchang, Sun Han, et al. Geomagnetic Survey Satellites[J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(6): 1 947-1 958(冯彦,安振昌,孙涵,等. 地磁测量卫星[J]. 地球物理学进展, 2010, 25 (6): 1 947-1 958)
- [8] Xu Wenyao. Advances on Geomagnetic Observations and Studies in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1997, 40(Supp): 217-230(徐文耀. 我国地磁观测研究的发展[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 217-230)
- [9] Feng Yan, An Zhenchang, Sun Han, et al. A Study on Model of Geomagnetic Normal Field of China Region[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(7): 723-729(冯彦,安振昌,孙涵,等. 中国地区地磁正常场模型的研究[J]. 地球科学进展, 2010, 25(7): 723-729)
- [10] Maus S, Macmillan S, Mclean S, et al. The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015[OL]. <http://nora.nerc.ac.uk/18737/>, 2012
- [11] Li Zhongliang, Bian Shaofeng. World Magnetic Model(WMM)2010 and Its Application[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011, 31(2): 58-61(李忠亮,边少锋. 世界地磁模型 WMM2010 及其应用[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(2): 58-61)
- [12] Wang Danwen. Analysis of the International Geomagnetic Reference Field Error in the China Continent[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(2): 63-73(王奠文. 国际地磁参考场在中国大陆地区的误差分析[J]. 地球物理学报, 2003,46(2): 63-73)
- [13] Baraclough D R. A Comparison of Satellite and Observatory Estimates of Geomagnetic Secular Variation [J]. *J Geophys Res*, 1985, 90: 2 523-2 526

## Compare of WMM2010 and IGRF11 Model with Annual Mean Value of Geomagnetic Observatories

CHANG Yifeng<sup>1</sup> CHAI Hongzhou<sup>1</sup> MING Feng<sup>1</sup> XIE Kai<sup>1</sup>

1 Institute of Geography Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China

**Abstract:** The relationship between the observed value and the latest World Magnetic Model WMM2010, constructed with various satellite geomagnetic data, is studied; as well as the relationship between the observed value and the International Geomagnetic Reference Field model IGRF11. First-

ly, a comparison is made between IGRF11 and the observed value. The precision and reliability of IGRF was evaluated. Then, the difference between WMM2010 and IGRF11 was analyzed. Indexes, such as absolute errors, mean square root errors, relative errors and weigh coefficients, are introduced to compare the two models. The results suggest that the WMM2010 model has more reference value for the normal field correction in the geomagnetic abnormality field research, thus filling a gap to improve the boundary effect.

**Key words:** satellite geomagnetic survey; WMM2010; IGRF11; observatories; model

**First author:** CHANG Yifeng, PhD candidate, specializes in data processing of geodesy and geomagnetic model. E-mail: changyifeng1986@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41274045.

(上接第900页)

## Automatic Matching for Optical Imagery Acquired from Domestic Satellites Based on Rigorous Orientation Model

ZHANG Yongjun<sup>1</sup> XIONG Jinxin<sup>1</sup> YU Lei<sup>1</sup> LING Xiao<sup>1</sup>

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** An image matching method based on a rigorous orientation model is presented that exploits the characteristics of optical imagery acquired from domestic satellites from different sensors. Firstly, this paper improves the method for scan line iterative search on the basis of the existing methods, and proposes the rapid correspondence prediction method. Next, with the help of the global SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) data, the approximate epipolar line is constructed by projection tracking. The geometric and radiometric deformation in the matching window is eliminated by the correction of local distortion. At last, in original level, the MPG algorithm is adopted to refine the matching results. This paper proposes a matching algorithm based on the geometric correction of the facet and the matching growth algorithm of a control network, which improves matching accuracy and the distribution of the matching points. A test with imagery data from the TH1, ZY02C and ZY3 satellites showed that the proposed method can combine the characteristics of the optical imagery acquired from domestic satellites, and yield multi-source image matching from multi-source sensors. A well distributed set of matching points can be obtained.

**Key words:** rigorous orientation model; correspondence prediction; SRTM; image matching; domestic satellite; TH1 satellite; ZY1-02C satellite; ZY3 satellite

**First author:** ZHANG Yongjun, professor. He is now interested in digital photogrammetry, remote sensing and computer vision. E-mail: changyifeng1986@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41322010; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2013AA12A401; the Academic Award for Excellent PhD Candidates Funded by Ministry of Education of China, No. 5052011213018.