

# 地磁日变数据确定中顾及纬度和经度方向影响的双因子定权方法

刘晓刚<sup>1,2</sup> 徐婧林<sup>1,3</sup> 张素琴<sup>4</sup> 管 斌<sup>1,2</sup>

1 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

2 西安测绘研究所,陕西 西安,710054

3 西北工业大学,陕西 西安,710072

4 中国地震局地球物理研究所,北京,100081

**摘要:**首先分析了地磁日变数据确定时传统使用的基于台站间纬度差和距离定权方法存在的缺陷;然后根据地磁场与纬度变化关系密切这一特点,提出了顾及纬度和经度方向影响的双因子定权的地磁日变数据确定方法;最后利用Intermagnet网站提供的地磁台站测量数据对所提方法的有效性进行了验证。与传统使用的距离定权法和纬度差定权法处理精度相比较,所提出的双因子定权方法具有更大的优势,为地磁日变数据的确定提供了一种新的更优的方法,在卫星、航空和海洋磁测数据的日变改正中将有较好的应用前景。

**关键词:**航空磁力测量;地磁台站;日变改正;双因子定权;Intermagnet

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

航空磁力测量技术,具有测量效率高、获取信息量大、不受地形地貌限制、覆盖面宽等优点,是快速经济地获取精度高、均匀分布地球磁场数据最有效、最快捷的技术手段<sup>[1-5]</sup>。

地球磁场是由地球内部的磁性岩石以及分布在地球内部和外部的电流体系所产生的各种磁场成分叠加而成的三维矢量物理场<sup>[6-11]</sup>,因此,绝对稳定的地磁场是不存在的,测量中能够做到的是从观测量中分离并移除外部变化部分,得到似稳态磁场。需改正的变化量主要由太阳对外层大气的电离作用及地球的自转运动引起,总体而言具有日周期特性,此即地磁日变改正<sup>[12-14]</sup>。

目前,地磁日变改正最有效的技术途径是在航空磁力测量试验区设置地磁日变站,实时测量地球磁场的变化,通过对日变观测数据处理,计算日变改正,这种方法精度很高,结果可靠。但是,对于高山、冰川、原始森林、荒漠、沼泽、湖泊、陆海交界等人员和车辆难以到达的试验区,要在这些地方设置地磁日变站,其难度可想而知。因此,为了解决这一问题,就需要采用地磁日变数据确定方法,利用试验区周边已知地磁台站或架

设的地磁日变站的测量数据,对试验区内某点的地磁值进行估计,获得地磁日变改正数据,即建立虚拟地磁日变站,从而实现对航空磁力测量数据进行日变改正的目的。

传统中经常使用的地磁日变数据确定方法有直接平均法、加权平均法和函数拟合法等<sup>[14-16]</sup>,在加权平均法中,反距离加权平均法<sup>[14]</sup>以每个台站与待求点之间距离倒数的 $k$ 次方来定权,与空间变化密切相关,同时由于该方法计算量小,具有较好的精度,因此,在地磁日变数据确定中的应用最为普遍。另外,卞光浪等<sup>[15]</sup>提出以台站间纬度差来定权的地磁日变数据确定方法。

根据中国陆地各个区域实测的磁力数据可知,磁力数据与测点所处位置的纬度值关系密切,而与经度值的关系较小。因此,反距离加权平均法采用已知台站和待求点之间距离倒数的 $k$ 次方来定权,相当于将纬度和经度方向的影响综合考虑,从而降低了纬度方向的变化对于磁力数据的影响,另外又加大了经度方向的权重;利用已知台站和待求点之间纬度差倒数的 $k$ 次方来定权,则直接忽略了经度方向变化对于磁力数据的

收稿日期:2019-12-27

项目资助:国家重点研发计划(2018YFC1503806);国家自然科学基金(41774018);西北工业大学博士论文创新基金(CX201814);地理信息工程国家重点实验室开放研究基金(SKLGIE2017-Z-3-2)。

第一作者:刘晓刚,博士,副研究员,主要从事地球重磁场探测技术及数据处理工作。liuxiaogang\_1949@163.com

影响,也是不全面的。故直接采用距离或纬度差倒数的 $k$ 次方来定权是不合理的,需要研究新的定权方法。

基于上述考虑,受杨元喜院士“双因子定权”思想的启发<sup>[17]</sup>,本文提出了顾及纬度方向和经度方向影响的双因子定权方法,即在地磁日变数据确定的定权过程中分别考虑地磁台站的纬度方向与经度方向在权值中的影响,进而获得待求点的地磁日变数据。为了验证本文所提定权方法的有效性,以传统使用的距离定权法和纬度差定权法作为对比。

## 1 传统定权方法

### 1.1 反距离加权平均法

反距离加权平均法是以待求点为中心,确定一定搜索半径内所有已知地磁台站的个数,计算每个台站到待求点的距离,以该距离倒数的 $k$ 次方为权值,计算待求点的值并作为其观测值。计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n [(\frac{1}{d_i^k}) \times T_i]}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{d_i^k})}, k \geq 0 \quad (1)$$

式中, $T_i$ 为已知地磁台站的观测数据(包括7个地磁要素,分别为地磁北向分量 $X$ 、地磁东向分量 $Y$ 、地磁垂直分量 $Z$ 、地磁总强度 $F$ 、地磁水平分量 $H$ 、磁偏角 $D$ 、磁倾角 $I$ 等); $n$ 为台站个数; $M$ 为待求点的计算值; $d_i$ 表示已知台站到待求点的几何距离。

### 1.2 纬度差加权平均法

纬度差加权平均法的实质是以搜索半径内台站之间纬度差倒数的 $k$ 次方为权值,进而获得待求点的计算值<sup>[15]</sup>。计算公式为:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n [(\frac{1}{|B_i|^k}) \times T_i]}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{|B_i|^k})}, k \geq 0 \quad (2)$$

式中, $B_i$ 为已知台站和待求点之间的纬度差,其余符号的含义与式(1)相同。

## 2 双因子定权方法

顾及纬度和经度方向影响的双因子定权方法,是考虑到地磁测量数据与所处位置的纬度大小密切相关,而与经度大小关系较小,因此,在定权时将纬度方向和经度方向的变化分开考虑,赋以不同的权因子,从而突出纬度方向的贡献,增

加其权重。根据纬度和经度的组合关系,本文共提出7种模型,记为BL1~BL7。

BL1模型是以纬度差倒数与经度差倒数和的 $k$ 次方为权值:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n [(\frac{1}{|B_i|} + \frac{1}{|L_i|})^k \times T_i]}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{|B_i|} + \frac{1}{|L_i|})^k}, k \geq 0 \quad (3)$$

BL2模型是以纬度差倒数与经度差倒数乘积的 $k$ 次方为权值:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n [(\frac{1}{|B_i|} \frac{1}{|L_i|})^k \times T_i]}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{|B_i|} \frac{1}{|L_i|})^k}, k \geq 0 \quad (4)$$

BL3模型是以纬度差 $k$ 倍的倒数与经度差 $l$ 倍的倒数和为权值:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n [(\frac{1}{k|B_i|} + \frac{1}{l|L_i|}) \times T_i]}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{k|B_i|} + \frac{1}{l|L_i|})}, k > 0, l > 0 \quad (5)$$

BL4模型是以纬度差 $k$ 次方的倒数与经度差 $l$ 次方的倒数和为权值:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n [(\frac{1}{|B_i|^k} + \frac{1}{|L_i|^l}) \times T_i]}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{|B_i|^k} + \frac{1}{|L_i|^l})}, k \geq 0, l \geq 0 \quad (6)$$

BL5模型是以纬度差 $k$ 次方的倒数与经度差 $l$ 次方的倒数乘积为权值:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n [(\frac{1}{|B_i|^k} \frac{1}{|L_i|^l}) \times T_i]}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{|B_i|^k} \frac{1}{|L_i|^l})}, k \geq 0, l \geq 0 \quad (7)$$

BL6模型是以纬度差 $k$ 次方的倒数与经度差 $l$ 倍的倒数和为权值:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n [(\frac{1}{|B_i|^k} + \frac{1}{l|L_i|}) \times T_i]}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{|B_i|^k} + \frac{1}{l|L_i|})}, k \geq 0, l > 0 \quad (8)$$

BL7模型是以纬度差 $k$ 次方的倒数与经度差 $l$ 倍的倒数乘积为权值:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n [(\frac{1}{|B_i|^k} \frac{1}{l|L_i|}) \times T_i]}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{|B_i|^k} \frac{1}{l|L_i|})}, k \geq 0, l > 0 \quad (9)$$

式(3)~式(9)中, $L_i$ 为已知台站和待求点之

间的经度差,其余符号的含义与式(1)、式(2)相同。

### 3 数值实验与结果分析

#### 3.1 实验数据说明

目前,全球的地磁台站有 1 000 多个,可从 Inter-magnet 网站<sup>[18]</sup>上下载其中近 150 个地磁台站的观测数据,分别为  $F$ 、 $H$ 、 $D$ 、 $Z$  或者  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $F$  等地磁要素。

参与 Intermagnet 网站数据交流的地磁台站主要集中分布在欧洲,本次实验以匈牙利 NCK 地磁台站为中心,在其半径  $10^\circ$  以内的地磁台站的基本信息如表 1 所示(去掉观测数据存在问题的几个台站)。NCK 台站与其他台站之间的距离统计如表 2 所示。

#### 3.2 精度评估方式

本文以标准差、均方根误差以及相关系数作为地磁日变数据确定精度指标的评价方式。

表 1 台站基本信息

Tab.1 Basic Information of European Geomagnetic Observatories

台站代号	台站名	国家	纬度/(°)	经度/(°)
BDV	Budkov	捷克	49.08	14.02
BEL	Belsk	波兰	51.84	20.79
BFO	Black Forest	德国	48.33	8.33
FUR	Furstenfeldbruck	德国	48.17	11.28
HLP	Hel	波兰	54.61	18.82
HRB	Hurbanovo	斯洛伐克	47.86	18.19
LON	Lonjsko Polje	克罗地亚	45.41	16.66
NCK	Nagyceenk	匈牙利	47.63	16.72
PAG	Panagjurishte	保加利亚	42.50	24.2
SUA	Surlari	罗马尼亚	44.68	26.25
THY	Tihany	匈牙利	46.90	17.89
WIC	Conrad Observatory	奥地利	47.93	15.87
WNG	Wingst	德国	53.74	9.07

表 2 NCK 与其他台站之间的距离/km

Tab.2 Distance Between NCK and Other Geomagnetic Observatories/km

台站代号	SUA	WNG	PAG	BFO	HLP	BEL	FUR	BDV	LON	HRB	THY	WIC
台站距离	1 111	1 090	1 010	938	811	652	609	341	247	166	154	101

1) 标准差(standard deviation, STD)。

通过 NCK 台站的实测数据计算地磁日变数据确定结果的标准差,标准差越小,说明结果的精度越高。其计算公式为:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}{n-1}} \quad (10)$$

式中,  $u_i$  表示计算结果与实测数据之间的差值;  $\bar{u}$  表示计算结果与实测数据之间差值的平均值;  $n$  表示观测数据的个数;  $R$  表示计算结果的标准差。

2) 均方根误差(root mean square error, RMSE)。

通过 NCK 台站的实测数据计算地磁日变数据确定结果的均方根误差,均方根误差越小,说明结果的精度越高。其计算公式为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2}{n}} \quad (11)$$

式中,  $S$  表示计算结果的均方根误差;其他各量的含义与式(10)相同。

3) 相关性系数。

台站的测量数据基本反映了该站附近的地球物理场的属性,因此,根据这一特点,计算 NCK 台站的地磁日变数据确定结果与实测数据之间

的相关性系数,相关性系数越接近于 1,说明结果的精度越高。其计算公式为<sup>[19-20]</sup>:

$$\text{cov}(x, y) = E\{[x - E(x)][y - E(y)]\} \quad (12)$$

$$\text{cof}(x, y) = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma(x)\sigma(y)} \quad (13)$$

式中,  $E(x)$ 、 $E(y)$  表示变量  $x$ 、 $y$  的数学期望,也称为均值;  $\text{cov}(x, y)$  表示变量  $x$ 、 $y$  的协方差;  $\sigma(x)$ 、 $\sigma(y)$  表示变量  $x$ 、 $y$  的标准差;  $\text{cof}(x, y)$  表示变量  $x$ 、 $y$  的相关性系数。其中  $E(x)$ 、 $\sigma(x)$  表达式为:

$$E(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (14)$$

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - E(x))^2} \quad (15)$$

#### 3.3 实验结果分析

以表 1 中 13 个台站在 2018-05-01 的日变数据为研究对象,以传统使用的反距离加权法和纬度差加权法作为对比,对本文提出的双因子定权方法的有效性进行实验验证分析。在具体计算时,先将权因子( $k, l$ )取一个较大的范围,迭代步长也相应较大,得到待求点的日变结果后,根据式(12)~式(15)计算其与周围台站测量数据的相关性系数,将相关性系数最大值对应的权因子( $k, l$ )

作为基准,再取一个较小的范围,迭代步长也相应缩小,继续计算待求点的日变值。如此迭代,直至确定出最佳的权因子( $k, l$ ),并将其计算得到的地磁日变结果作为最优结果。

1)反距离加权平均法。

计算结果精度统计列于表3。可以看出,反距离加权平均法计算精度,北向分量 $X$ 和水平分量 $H$ 优于2.2 nT,东向分量 $Y$ 和总强度 $F$ 优于1.0 nT,垂直分量 $Z$ 优于0.3 nT,磁偏角 $D$ 和磁倾角 $I$ 优于10"。

表3 反距离加权平均法计算结果精度统计

Tab.3 Precision Statistics of Reverse Distance Weighting Method

地磁要素	最大值	最小值	平均值	标准差	均方根误差
X/nT	3.53	-5.60	-0.40	2.17	2.21
Y/nT	2.41	-2.11	-0.43	0.92	1.01
Z/nT	0.80	-0.85	-0.11	0.29	0.31
F/nT	2.07	-1.77	-0.11	0.87	0.88
H/nT	3.39	-5.54	-0.43	2.13	2.17
D/(')	0.39	-0.33	-0.05	0.16	0.17
I/(')	0.36	-0.21	0.02	0.14	0.14

2)纬度差加权平均法。

表5 顾及纬度和经度方向影响的双因子定权法计算结果精度统计(标准差/均方根误差)

Tab.5 Precision Statistics of the Bifactor Weight Determination Method Considering the Influence of Latitude and Longitude(STD/RMSE)

地磁要素模型	X/nT	Y/nT	Z/nT	F/nT	H/nT	D/(')	I/(')
BL1	1.39/1.59	0.93/1.00	0.62/0.72	0.97/1.06	1.40/1.54	0.19/0.19	0.09/0.09
BL2	1.37/1.54	0.93/1.00	0.53/0.58	0.87/0.94	1.39/1.51	0.19/0.20	0.08/0.09
BL3	1.34/1.51	1.27/1.41	0.71/0.77	0.99/1.12	1.35/1.49	0.21/0.22	0.09/0.09
BL4	1.34/1.50	0.74/1.13	0.37/0.37	0.80/0.85	1.35/1.46	0.11/0.16	0.08/0.09
BL5	1.34/1.50	0.70/1.01	0.25/0.30	0.78/0.80	1.35/1.46	0.10/0.14	0.08/0.09
BL6	1.34/1.50	0.70/1.01	0.37/0.37	0.81/0.86	1.35/1.45	0.10/0.14	0.08/0.09
BL7	1.34/1.51	0.70/1.01	0.34/0.34	0.82/0.84	1.35/1.49	0.10/0.14	0.08/0.09

每种模型计算结果的相关性系数变化如图1所示,可以看出,BL5模型获得的计算结果与实测数据的相关性系数最大,说明该模型得到的计算结果精度最高,这与表5的统计结果相吻合。这是因为,BL5模型以纬度差 $k$ 次方的倒数与经度差 $l$ 次方的倒数乘积为权值,权因子为指数,相比乘积来说这对权值的变化幅度影响较大,故当需要凸显纬度方向的贡献或者降低经度方向的贡献时效果非常显著,并且两者乘积又相比求和进一步增大了影响。因此,本文将BL5模型与传统定权方法进行对比,从而对新建模型的有效性作出评价。

计算结果精度统计列于表4。可以看出,纬度差加权平均法计算精度,北向分量 $X$ 和水平分量 $H$ 优于2.5 nT,东向分量 $Y$ 优于0.7 nT,垂直分量 $Z$ 优于0.4 nT,总强度 $F$ 优于1.2 nT,磁偏角 $D$ 优于6",磁倾角 $I$ 优于10"。

表4 纬度差加权平均法计算结果精度统计

Tab.4 Precision Statistics of Reverse Latitude Difference Weighting Method

地磁要素	最大值	最小值	平均值	标准差	均方根误差
X/nT	3.70	-6.40	-0.48	2.44	2.49
Y/nT	0.73	-2.69	-0.73	0.70	1.01
Z/nT	0.99	-1.21	-0.17	0.40	0.44
F/nT	2.06	-3.73	-0.32	1.18	1.23
H/nT	3.60	-6.65	-0.59	2.48	2.54
D/(')	0.11	-0.36	-0.10	0.10	0.14
I/(')	0.41	-0.23	0.03	0.16	0.16

3)顾及纬度和经度方向影响的双因子定权法。

本文提出的7种模型BL1~BL7对应的各地磁要素计算结果的精度统计(仅列出标准差和均方根误差)见表5。

BL5模型计算结果的精度统计见表6。可以看出,顾及纬度和经度方向影响的双因子定权法计算精度,北向分量 $X$ 和水平分量 $H$ 优于1.5 nT,东向分量 $Y$ 和总强度 $F$ 优于0.8 nT,垂直分量 $Z$ 优于0.3 nT,磁偏角 $D$ 和磁倾角 $I$ 优于6"。

4)不同方法结果对比。

将本文提出的双因子定权法与传统定权方法进行对比,各种方法的计算结果如图2~图8所示。

图2~图8中, $T0$ 表示NCK台站实测数据, $T1$ 表示反距离加权平均计算结果, $T2$ 表示纬度差加权平均法计算结果, $T3$ 表示顾及纬度和经度方向影响的双因子定权方法计算结果(BL5模型)。

表 6 BL5 模型计算结果精度估计

Tab.6 Precision Statistics of BL5 Model

地磁要素	最大值	最小值	平均值	标准差	均方根误差
$X/nT$	4.54	-1.14	0.68	1.34	1.50
$Y/nT$	0.73	-2.69	-0.73	0.70	1.01
$Z/nT$	0.50	-0.86	-0.16	0.25	0.30
$F/nT$	2.38	-1.08	0.18	0.78	0.80
$H/nT$	4.40	-1.25	0.56	1.35	1.46
$D/(')$	0.11	-0.36	-0.10	0.10	0.14
$I/(')$	0.07	-0.30	-0.03	0.08	0.09

图 4 地磁垂直分量  $Z$  计算结果  
Fig.4 Results of Vertical Component  $Z$

图 1 顾及纬度和经度方向影响的双因子定权法中几种模型计算结果的相关性系数

Fig.1 Correlation Coefficients of the Models of Bifactor Weight Determination Method Considering the Influence of Latitude and Longitude

图 5 地磁总强度  $F$  计算结果  
Fig.5 Results of Total Geomagnetic Field Strength  $F$

图 2 地磁北向分量  $X$  计算结果  
Fig.2 Results of Northern Component  $X$

图 6 地磁水平分量  $H$  计算结果  
Fig.6 Results of Horizontal Component  $H$

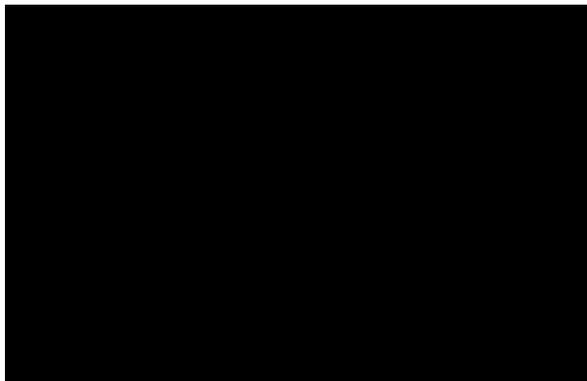


图 3 地磁东向分量  $Y$  计算结果  
Fig.3 Results of Eastern Component  $Y$

图 7 磁偏角  $D$  计算结果  
Fig.7 Results of Geomagnetic Declination  $D$

图8 磁倾角 $I$ 计算结果Fig.8 Results of Geomagnetic Inclination  $I$ 

由图2~图8可以看出,相较于传统使用的距离定权法和纬度差定权法,本文提出的顾及纬度和经度方向影响的双因子定权方法,其计算结果与实测数据的变化更加一致,说明了新方法的精度要优于传统方法。各种定权方法对应结果与实测数据的相关性系数如图9所示。

图9 不同方法得到的计算结果相关性系数  
Fig.9 Correlation Coefficients of Geomagnetic Elements of Different Methods

图9的结果更加明显,本文提出的双因子定权方法与实测数据的相关性系数明显优于传统定权方法,充分证明了新方法的正确性和有效性。

## 4 结 语

根据以上分析,在本文的地磁日变数据确定实验中,以计算结果精度统计的标准差为例,可以得到下述结论:

1)本文提出的双因子定权方法精度,地磁矢量优于1.5 nT,总强度 $F$ 优于0.8 nT,磁偏角 $D$ 和磁倾角 $I$ 优于6"。

2)与反距离加权平均法计算结果精度相比较,北向分量 $X$ 和水平分量 $H$ 提高了约0.8 nT,磁偏角 $D$ 和磁倾角 $I$ 提高了约3.6";与纬度差加权

平均法计算结果精度相比较,北向分量 $X$ 和水平分量 $H$ 提高了约1.1 nT,磁倾角 $I$ 提高了约4.8"。

3)本文提出的双因子定权方法,计算结果与待求点实际地磁测量数据的相关性很高(相关性系数在0.98以上),基本反映了待求点实际地磁测量数据的物理属性。

致谢:感谢 Intermagnet 网站提供的地磁台站数据。

## 参 考 文 献

- [1] Xiong Shengqing. The Present Situation and Development of Airborne Gravity and Magnetic Survey Techniques in China [J]. *Progress in Geophys*, 2009, 24(1): 113-117(熊盛青. 我国航空重磁勘探技术现状与发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 113-117)
- [2] Chen Bin, Xiong Shengqing, Zhao Baimin. The Preliminary Study on Flight Altitude of Aero-Magnetic Survey [J]. *Progress in Geophys*, 2010, 25(3): 957-961(陈斌,熊盛青,赵百民. 航空磁测飞行高度的初步研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 957-961)
- [3] Luo Yao, Wang Ping, Duan Shuling, et al. Leveling Total Field Aeromagnetic Data with Measured Vertical Gradient[J]. *Chinese J Geophys*, 2012, 55(11): 3 854-3 861(骆遥,王平,段树岭,等. 航磁垂直梯度调整 $\Delta T$ 水平方法研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3 854-3 861)
- [4] Liu Xiaogang, Li Yingchun, Xiao Yun, et al. Optimal Regularization Parameter Determination Method in Downward Continuation of Gravimetric and Geomagnetic Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(9): 881-887(刘晓刚,李迎春,肖云,等. 重力与磁力测量数据向下延拓中最优正则化参数确定方法[J]. 测绘学报, 2014, 43(9): 881-887)
- [5] Liu Xiaogang, Li Yingchun, Xiao Yun, et al. Downward Continuation of Airborne Magnetic Data Based on Two Iterative Regularization Methods in Frequency Domain[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2015, 6(1): 34-40
- [6] Xu Wenyaoyao. Geomagnetism [M]. Beijing: Seismological Press, 2003(徐文耀. 地磁学[M]. 北京:地震出版社, 2003)
- [7] Guan Zhining. Geomagnetic Field and Magnetic Exploration [M]. Beijing: Geological Press, 2005(管志宁. 地磁场与磁力勘探[M]. 北京:地质出版社, 2005)
- [8] Alan W P T, Vincent L. An Improved Geomagnetic Data Selection Algorithm for Global Geomagnetic

- Field Modelling [J]. *Geophys J Int*, 2007, 169: 951-963
- [9] Carrasco F J P, Osete M L, Torta J M. A Regional Archaeomagnetic Model for the Palaeointensity in Europe for the Last 2000 Years and Its Implications for Climatic Change[J]. *Pure Appl Geophys*, 2008, 165: 1 209-1 225
- [10] Hulot G, Finlay C C, Constable C G, et al. The Magnetic Field of Planet Earth[J]. *Space Sci Rev*, 2010, 152: 159-222
- [11] Zhang Suqin, Fu Changhua, Zhao Xudong. Study of Regional Geomagnetic Model of Fujian and Adjacent Areas Based on 3D Taylor Polynomial Model [J]. *Chinese J Geophys*, 2016, 59(6): 1 948-1 956 (张素琴,付长华,赵旭东. 基于三维 Taylor模型的福建及邻近地区地磁模型研究[J]. 地球物理学报,2016, 59(6): 1 948-1 956)
- [12] Bian Gang, Liu Yanchun, Bian Guanglang, et al. Research on Computation Method of Multi-station Diurnal Variation Correction in Marine Magnetic Surveys [J]. *Chinese J Geophys*, 2009, 52(10): 1 284-1 289(边刚,刘雁春,卞光浪,等. 海洋磁力测量中多站地磁日变改正值计算方法研究[J]. 地球物理学报,2009, 52(10): 1 284-1 289)
- [13] Bian Guanlang, Zhai Guojun, Liu Yanchun, et al. Effective Operating Range of Base Stations in Marine Geomagnetic Survey[J]. *Progress in Geophys*, 2010, 25(3): 817-822(卞光浪,翟国君,刘雁春,等. 海洋磁力测量中地磁日变站有效控制范围确定[J]. 地球物理学进展,2010, 25(3): 817-822)
- [14] Gu Chunlei, Zhang Yi, Xu Rugang, et al. The Method of Geomagnetic Diurnal Correction to Vector Geomagnetic Data by Virtual Diurnal Variation Station[J]. *Chinese J Geophys*, 2013, 56(3): 834-841(顾春雷,张毅,徐如刚,等. 基于虚拟日变台进行地磁矢量数据日变变化方法[J]. 地球物理学报,2013, 56(3): 834-841)
- [15] Bian Guanglang, Liu Yanchun, Zhai Guojun, et al. Diurnal Geomagnetic Correction with Multi-observatories in Marine Magnetic Surveying [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(3): 118-110(卞光浪,刘雁春,翟国君,等. 基于纬差加权法的海洋磁力测量多站地磁日变改正值计算[J]. 测绘科学, 2010, 35(3): 118-110)
- [16] Guo Jianhua, Xue Dianjun. The Application and Method Research of Magnetic Diurnal Calibration Based on Multi-station[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1999, 20(sup): 932-937(郭建华,薛典军. 多站地磁日变校正方法研究及应用[J]. 地球学报, 1999, 20(sup): 932-937)
- [17] Yang Y X, Song L J, Xu T H. Robust Estimator for Correlated Observations Based on Bifactor Equivalent Weights[J]. *J Geod*, 2002,76: 353-358
- [18] Xin Changjiang, Li QiuHong. Brief Introduction of Geomagnetic Observatory of Intermagnet [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2001, 22(3): 48-52(辛长江,李秋红. Intermagnet地磁台站简介[J]. 地震地磁观测与研究,2001, 22(3): 48-52)
- [19] Sheng Zou, Xie Shiqian, Pan Chengyi. Probability and Mathematical Statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1979(盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,1979)
- [20] Wu Yi, Li Yongle, Hu Qingjun. Application Mathematical Statistics[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1995(吴翊,李永乐,胡庆军. 应用数理统计[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1995)

## Bifactor Weight Determination Method Considering the Influence of Latitude and Longitude in the Calculation of Diurnal Variation of Geomagnetic Data

LIU Xiaogang<sup>1,2</sup> XU Jinglin<sup>1,3</sup> ZHANG Suqin<sup>4</sup> GUAN Bin<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China

2 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

3 Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

4 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

**Abstract:** The deficiencies of reverse distance weighting method and reverse latitude difference weighting method traditionally used in the calculation of diurnal variation of geomagnetic data are analyzed. According

to the characteristics that the geomagnetic field has affinity with the changing of latitude, and considering the influence of latitude and longitude in the calculation of diurnal variation of geomagnetic data, the bifactor weight determination method is proposed. The validity of the proposed method is testified using geomagnetic observatory data supplied by Intermagnet website. Compared with the reverse distance weighting method and reverse latitude difference weighting method, the new bifactor weight determination method has more superiority. Experimental result shows that the proposed method is applicable in the calculation of diurnal variation of geomagnetic data, and it may have wide application prospect in diurnal variation correction of satellite, airborne and seaborne geomagnetic measurement data.

**Key words:** airborne geomagnetic measurement; geomagnetic observatory; diurnal variation correction; bifactor weight; Intermagnet

**First author:** LIU Xiaogang, PhD, associate researcher, specializes in the gravimetry and geomagnetic data processing. E-mail: liuxiaogang\_1949@163.com

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China(2018YFC1503806); the National Natural Science Foundation of China(41774018); Innovation Foundation for Doctor Dissertation of Northwestern Polytechnical University(CX201814); Open Foundation of State Key Laboratory of Geo-information Engineering(SKLGIE2017-Z-3-2).

**引文格式:** LIU Xiaogang, XU Jinglin, ZHANG Suqin, et al. Bifactor Weight Determination Method Considering the Influence of Latitude and Longitude in the Calculation of Diurnal Variation of Geomagnetic Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(10):1547-1554. DOI:10.13203/j.whugis20180454(刘晓刚,徐婧林,张素琴,等.地磁日变数据确定中顾及纬度和经度方向影响的双因子定权方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2020,45(10):1547-1554. DOI:10.13203/j.whugis20180454)

---

(上接第 1546 页)

information representation in the digital earth domain. The general methods for calculating the area of a spherical triangular grid are not accurate. So a fractal method for area calculation is proposed. Firstly, in the same level, areas of spherical triangular grid recoded to 0 or 1 are computed respectively. Then multi-fractal area calculation functions are fitted, which is used as an area calculation model. Finally, the accuracy of the model is calculated by relative root mean square error. Experimental result shows that, with the increase of the number of multifractals, the accuracy of area calculation of grid cells increases and is controllable.

**Key words:** Discrete global grid; Spherical triangle; Fractal coding; Cell area; Computational model

**First author:** WANG Zheng, PhD candidate, specializes in the theories and applications of discrete global grid. E-mail: wangzheng@ncst.edu.cn

**Corresponding author:** ZHAO Xuesheng, PhD, professor. E-mail: zxs@cumtb.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China(41671394); the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0505301).

**引文格式:** WANG Zheng, ZHAO Xuesheng, LUO Fuli, et al. A Fractal Method for Area calculation of the Spherical Triangular Grid[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(10):1 541-1 546, 1 554. DOI:10.13203/j.whugis20180478(王政,赵学胜,罗富丽,等.球面三角格网单元面积的分形计算[J].武汉大学学报·信息科学版,2020,45(10):1 541-1 546, 1 554. DOI:10.13203/j.whugis20180478)