

边刚, 夏伟, 金绍华等. 2015. 利用最小二乘拟合法进行多站地磁日变基值归算. 地球物理学报, 58(4):1284-1289, doi:10.6038/cjg20150416.

Bian G, Xia W, Jin X H, et al. 2015. Datum reduction with the least squares fitting method in correction of multi-station geomagnetic diurnal variations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(4):1284-1289, doi:10.6038/cjg20150416.

# 利用最小二乘拟合法进行多站地磁日变基值归算

边刚<sup>1,2,3</sup>, 夏伟<sup>1,2,3</sup>, 金绍华<sup>1,2,3</sup>, 吴迪<sup>1,3</sup>,

肖付民<sup>1,3</sup>, 孙新轩<sup>1,3</sup>, 王美娜<sup>1,3</sup>

1 海军大连舰艇学院海洋测绘系, 大连 116018

2 海军工程大学导航工程系, 武汉 430033

3 海洋测绘工程军队重点实验室, 大连 116018

**摘要** 多站日变改正技术是解决远海区大范围磁力测量地磁日变改正的关键技术, 然而多站日变改正中, 为了减小磁场水平差异的影响, 分站日变基值必须向主站归算. 基于地磁日变化的时空特点, 尝试将最小二乘拟合法引入到多站日变基值归算中, 并采用多站同步观测数据对方法的有效性进行了验证. 结论表明: 当主站和分站日变性质相似时, 最小二乘拟合法可以取得良好的效果, 且对同步观测时段低. 但是当日变性质差异较大时, 则应当采用传统的同步比对法.

**关键词** 海洋磁力测量; 多站日变改正; 日变基值归算; 最小二乘拟合法

doi:10.6038/cjg20150416

中图分类号 P229, P318

收稿日期 2014-01-17, 2014-07-17 收修定稿

## Datum reduction with the least squares fitting method in correction of multi-station geomagnetic diurnal variations

BIAN Gang<sup>1,2,3</sup>, XIA Wei<sup>1,2,3</sup>, JIN Shao-Hua<sup>1,2,3</sup>, WU Di<sup>1,2</sup>,

XIAO Fu-Min<sup>1,3</sup>, SUN Xin-Xuan<sup>1,3</sup>, WANG Mei-Na<sup>1,3</sup>

1 Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

2 Institute of Navigation Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

3 Key Laboratory of Hydrography and Cartography of PLA, Dalian 116018, China

**Abstract** The geomagnetic diurnal variation is the main influence in marine magnetic survey, especially in offshore and large areas. The multi-station method is the main technique to deal with the geomagnetic diurnal variation correction. However, to diminish the difference between the magnetic field data and multi-station data, the correctional datum of the secondary station must be reduced to the main station.

In marine surveys, the least squares fitting method has been applied in the interpolation of the height of the tide. Considering the similarity of the influence mechanism of the tidal variation and the geomagnetic diurnal variation, the least squares fitting method has been introduced in the datum reduction. The datum of the secondary station can be corrected, which is decided by the expansion and contraction of the amplitude, the translation of the time (phase) of the diurnal variation of the main station, and the residual error of the diurnal variation correction of the

main and secondary station is minimum with the least square method. The validity of the method has been testified by the observed synchronous data of the multi-station.

The results show that the least squares fitting method can be applied when the characteristics of the diurnal geomagnetic variations of the stations are similar, which requires a short synchronous observation period. Otherwise the synchronous correction method should be qualified.

The conclusion shows that the least squares fitting method can be effectively applied in the datum reduction with multi-station diurnal variation correction, therefore the difference of the magnetic field which is caused by datum can be diminished and the geomagnetic diurnal variation correction precision can be improved in magnetic surveys in offshore and large areas. Moreover the reduction method must be adjusted to the need of the practice. In addition, the least squares fitting method can be applied in the determination of the time difference and the correction value interpolation.

**Keywords** Marine magnetic survey; Multi-station diurnal variation correction; Datum reduction; Least squares fitting method

## 1 引言

地球变化磁场对磁力测量的影响,在磁静日为 $10\sim 40$  nT,而磁扰日时可达 $100\sim 1000$  nT(徐文耀,2003;管志宁,2005).一般认为变化磁场在一定范围内是同步的,即它们在空间上是相关的(袁景山等,2003;高金耀等,2009).在陆地上同步范围约 $400\sim 500$  km,至少可达 $100\sim 200$  km,而在海洋区域,受到海流电磁感应、海底和沿岸海域的电导结构以及岸线的形状的影响,地磁日变化更复杂,其同步范围可能更小(祁贵仲,1975).同时受海岸效应的影响,采用沿岸日变站进行地磁日变改正,将会产生很大的幅值和相位误差(Auld,1979;Whellams,1996;Riddihough,2002;王磊等,2011).当测区范围较大或远海区测量时,在一定磁测精度误差约束条件下,受限于日变站有效作用距离,单个日变站往往难以对整个测区进行控制.为此,采用多站日变改正技术是解决远海区海洋磁力测量地磁日变改正的关键技术(郭建华和薛典军,1999;徐行等,2007;边刚等,2009).然而,多站日变改正中,为了使整个测区磁场水平统一,必须对各站日变基值进行归算(DZ/T 0142-94,1995).《海洋调查规范·海洋地质地球物理调查》(GB/T13909-92,1993)和《海洋磁力测量要求》(GJB.7537-2012,2012)中规定,同一测区使用两个以上日变站资料时,应选取靠近测区的日变站作为主站,其他日变站的日变基值向主站归算.目前常用的方法是同步比对法,假设在同步观测期间内,主站和分站的地磁日变观测值的平均值与日变基值

的差值相等.由主站的日变基值归算得到分站的日变基值.该方法的一个前提是要求影响日变的因素对各站平均效应相同,为了获得较为稳定的日变基值,往往需要较长时间的同步观测数据(韩建平,1994;边刚等,2003;卞光浪等,2009).

由地磁日变化的时空分布特点不难发现,其对海洋磁力测量的影响与潮汐对海洋水深测量的影响的机理是相似的,都具有一定的时空特性,需要布设日变站(验潮站)进行变化监测,从而消除其影响(梁开龙等,1996;边刚和刘雁春,2008).目前,海洋水深测量中的潮汐改正技术已相当成熟,如水位分带改正法、时差法、最小二乘拟合法以及潮汐分区法(刘雁春等,2006).特别是最小二乘拟合法充分利用站间的潮位数据通过计算两验潮站间的潮差比、潮时差和基准面偏差,取得了良好的效果(刘雁春,2003).基于地磁日变的时空特性,本文尝试将最小二乘拟合法引入到多站日变改正中日变基值的归算,探讨其有效性,并采用同步观测数据对方法的有效性进行验证.

## 2 最小二乘拟合法

1992年刘雁春将最小二乘拟合法引入到海洋水深测量潮位值的内插,取得了良好的效果(刘雁春,2003).由于地磁日变对海洋磁力测量的影响与潮汐对海洋水深测量的影响的相似的,不妨将其引入到多站日变改正日变基值的归算中,基本原理如下.

最小二乘拟合法是建立在区域内站间日变化随

平面位置呈线性变化的基础上,将主站日变改正值幅值上进行伸缩,时间(相位)上进行平移,使得伸缩平移后主站与分站的日变改正值在最小二乘约束条件下残差平方和为最小.首先对主站和分站的地磁日变数据进行最小二乘拟合,确定出比较传递参数  $\gamma_{AB}$ 、 $\delta_{AB}$  和  $\epsilon_{AB}$ , 即有:

$$T_B(t) = \gamma_{AB} \times T_A(t + \delta_{AB}) + \epsilon_{AB}, \quad (1)$$

其中,  $\gamma_{AB}$ 、 $\delta_{AB}$  和  $\epsilon_{AB}$  分别为主站 A 和分站 B 间的日变幅值比、站间时差和日变基值偏差.

从上述数学模型可以看出,多站日变改正基值的归算中,问题的关键是确定两日变站间的日变差值比  $\gamma_{AB}$ (或  $\gamma_{BA}$ )、日变时差  $\delta_{AB}$  或  $\delta_{BA}$ ) 以及日变基值偏差  $\epsilon_{AB}$ (或  $\epsilon_{BA}$ ). 其确定方法如下:

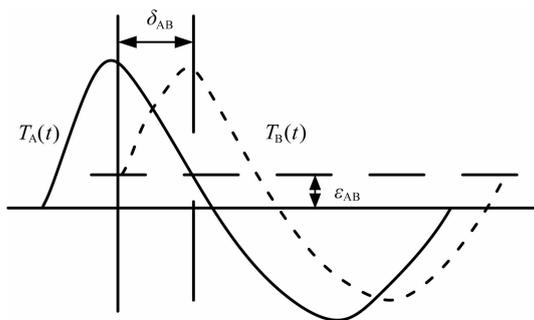


图 1 最小二乘拟合法原理示意图

Fig. 1 Sketch of the least squares fitting method

如图 1, 设主站 A 和分站 B 两站日变站日变曲线的离散采样序列为:

$$T_A(t_0 + n\Delta t_0), n = 0, 1, \dots, N,$$

$$T_B(t_0 + n\Delta t_0), n = 0, 1, \dots, N,$$

其中  $t_0$  为初始时刻,  $\Delta t_0$  为采样间隔, 可取  $\Delta t_0 = 1, 5, 10, 20, 30, 60$  s;  $N$  为采样总个数.

建立主站和分站地磁日变曲线比较拟合误差方程如下:

$$v_n = \gamma_{AB} T_A(t_0 + n\Delta t_0 + \delta_{AB}) + \epsilon_{AB} - T_B(t_0 + n\Delta t_0), n = 0, 1, \dots, N, \quad (2)$$

给定初值  $\gamma_0$ 、 $\delta_0$  和  $\epsilon_0$ , 对上式进行线性化, 并写成矩阵形式为

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{L}, \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{V}$  为闭合差向量,  $\mathbf{A}$  为设计矩阵, 其行元素为  $[T_A(t_0 + n\Delta t_0 + \delta_0), \gamma_0 T'_A(t_0 + n\Delta t_0 + \delta_0), 1]$ ,  $n = 0, 1, \dots, N$ , 其中,  $T'_A(t_0 + n\Delta t_0 + \delta_0)$  为  $T$  对  $\delta$  的导数,  $\mathbf{X} = [\Delta\gamma, \Delta\delta, \Delta\epsilon]^T$  为未知参数向量,  $\mathbf{L}$  为常数向量, 其行元素为

$$[\gamma_0 T_A(t_0 + n\Delta t_0 + \delta_0) + \epsilon_0 - T_B(t_0 + n\Delta t_0)], n = 0, 1, \dots, N.$$

根据最小二乘原则  $[\mathbf{V}^T \mathbf{V}] = \min$ , 可得:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L}, \quad (4)$$

进一步得:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{AB} \\ \delta_{AB} \\ \epsilon_{AB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_0 \\ \delta_0 \\ \epsilon_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\gamma \\ \Delta\delta \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由此可见, 对于任意一个分站  $i$  而言, 只要利用主站 A 与分站  $i$  的地磁日变观测值, 采用最小二乘法求得站间的相关参数  $\gamma_{Ai}$ 、 $\delta_{Ai}$ 、 $\epsilon_{Ai}$ , 就可以归算得到分站  $i$  的日变基值  $T_i$  为

$$T_i = T'_i + \epsilon_{Ai}, \quad (6)$$

其中,  $T'_i$  表示第  $i$  个分站日变基值归算的起算值. 可先任意选择  $T'_i$  作为分站起算值, 不会影响基值归算结果, 本文直接用日变观测值代入计算, 即  $T'_i = 0$ .  $\epsilon_{Ai}$  即为由主站和第  $i$  个分站地磁日变曲线由最小二乘拟合法计算得到的日变基值偏差.

需要指出的是最小二乘拟合法是建立在区域内站间日变化随平面位置呈线性变化的基础上, 通过幅值伸缩和相位平移, 更加逼真地反映了站间日变化的关系, 其对于同步时间的要求较低. 但两站日变性质差异较大时, 一般不宜采用最小二乘拟合法.

### 3 实例分析比较

为了验证最小二乘拟合法在多站日变基值归算中的应用, 本文采用多站同步观测数据进行了计算与分析, 采用分站基值传算值最大互差作为评定指标(卞光浪, 2009), 并与常用的同步比对法(边刚和刘雁春, 2008)计算结果进行比对说明.

同步实测数据来源于某次海洋磁力测量, 同步地磁日变站点分布如图 2, 其中 A 站和 B 站间距离 97.69 km, A 站和 C 站间距离 925.20 km, B 站和 C 站间距离 828.72 km. 同步观测时期为 2006 年 8 月 25 至 8 月 28 日. 日变观测仪器采用 HC-90D 型高精度氦光泵地面日变磁力仪, 磁测灵敏度 0.001 nT, 同步观测时间取北京时间(以北京时间为基准的地方时), 数据采样间隔为 1 min, 选择各站地磁日变化平均值作为日变基值, 得到了各站每天地磁变化曲线如图 3.

从图中可以看出, 同步观测期间内(四天)日变幅度均小于 100 nT, 根据《规范》规定, 该同步观测时段内地磁日变化属于磁静日变化. 比较站间地磁变化曲线发现, 随着站间距离的增大, 地磁变化曲线差异逐渐增大. 其中 A 站和 B 站变化曲线几乎相

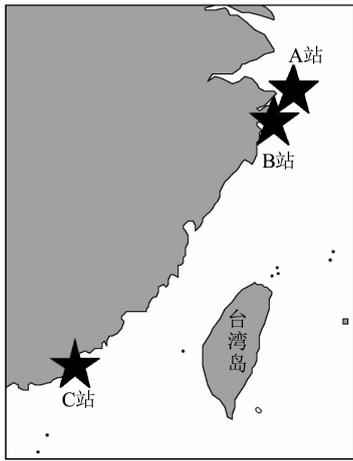


图 2 地磁日变站位置图

Fig. 2 Sketch map of basic stations

同,而它们与 C 站变化曲线差异则较大. 由地磁日变化的时空分布特点知,主要是由于 C 站与 A、B 两站的纬度差异引起的.

采用以上同步观测数据对最小二乘拟合法进行了验证,并采用分站基值归算值最大互差作为评定方法好坏的指标,并与常用的同步比对法计算结果进行分析比较.

设 A 站为主站,日变基值为 46994.27 nT, B 站和 C 站为分站,计算结果如下.

比较分站 B 两种方法计算结果可以看出,对于 B 站而言,虽然观测期间每日的日变均值不相同,最大相差可达 16.38 nT,但是归算后的每日的日变基值大致相等(同步比对法最大相差 0.82 nT,而最小二乘拟合法最大相差 0.33 nT),通过日变基值归算很好的减小了因日变基值引起的磁场水平差异,使整个测区磁场水平统一. 并且,相同日期的两种归算

表 1 同步比对法 B 站日变基值归算结果(单位:nT)

Table 1 Results of synchronous correction for basic station B (unit:nT)

日期	A 日均值	B 站日均值	B 站归算值	最大互差
08-25	46992.38	47136.44	47138.33	
08-25	46995.67	47139.71	47138.31	0.82
08-25	47001.50	47145.87	47138.64	
08-25	46985.35	47128.90	47137.82	

表 2 最小二乘拟合法 B 站日变基值归算结果(单位:nT)

Table 2 Results of least squares fitting method for basis station B (unit:nT)

站名	日期	$\gamma$	$\tau$	$\delta$	基值归算值	最大互差
B 站	08-25	0.971646	-0.038199	1.831	47138.27	
	08-25	1.013986	-1.036298	-1.418	47138.29	0.33
	08-25	1.073615	0.026819	-7.764	47138.11	
	08-25	1.015043	-0.028419	9.059	47137.96	

方法的基值归算值相差不大,最大互差为 0.53 nT (8 月 27 日). 然而不同日期相同方法的归算结果,同步比对法最大互差为 0.82 nT,而最小二乘拟合法的互差为 0.33 nT. 由此可见,对于分站 B 而言,由于 A 和 B 站距离较近,其日变性质较为相似,不同时段内归算参数较为稳定,基值归算值也较为一致,最小二乘拟合法要优于同步比对法.

同样,比较分站 C 两种方法计算结果可以看出,对于 C 站而言,虽然观测期间每日的日变均值不相同,最大相差可达 18.21 nT,但是归算后的每日的日变基值差异较日变均值有所减小(同步比对法最大相差 4.51 nT,而最小二乘拟合法最大相差

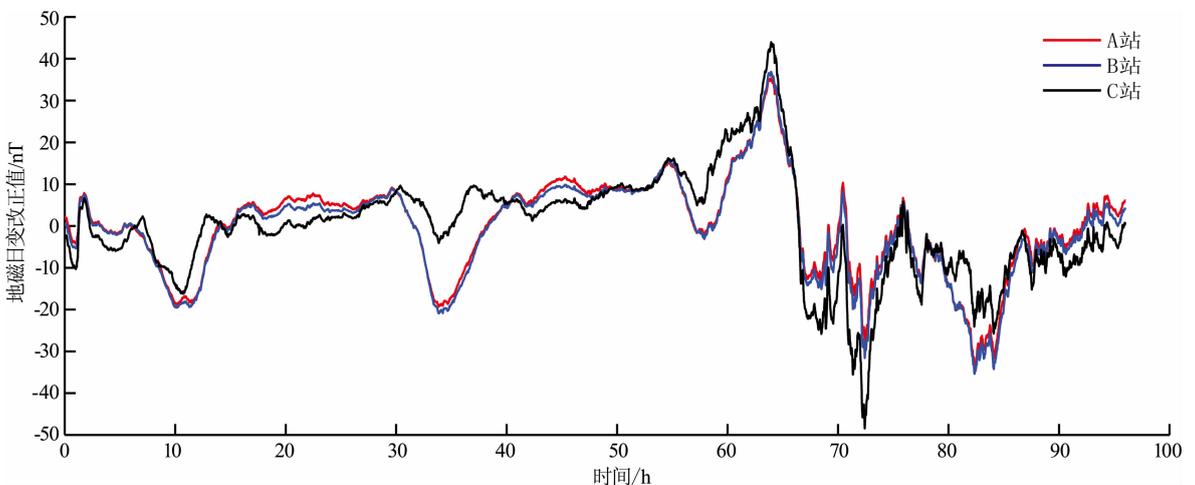


图 3 各站地磁变化曲线

Fig. 3 Synchronous curves of geomagnetic diurnal variations at three stations

表 3 同步比对法 C 站日变基值归算结果(单位:nT)

Table 3 Results of synchronous correction method for basic station C (unit:nT)

日期	A 日均值	C 站日均值	C 站归算值	最大互差
08-25	46992.38	45281.49	45283.38	4.51
08-25	46995.67	45288.68	45287.28	
08-25	47001.50	45292.06	45284.83	
08-25	46985.35	45273.85	45282.77	

表 4 最小二乘拟合法 C 站日变基值归算结果(单位:nT)

Table 4 Results of least squares fitting method for basis station C (unit:nT)

站名	日期	$\gamma$	$\tau$	$\delta$	基值 归算值	最大 互差
C 站	08-25	0.510526	3.741405	0.952	45282.44	9.10
	08-25	0.154586	1.113566	-0.219	45288.46	
	08-25	0.411663	1.699116	-10.187	45281.87	
	08-25	0.617877	0.190236	5.512	45279.36	

9.10 nT), 同时也减小了因日变基值引起的磁场水平差异. 并且相同日期的两种归算方法的基值归算值最大互差为 3.41 nT(8 月 28 日). 然而与 B 站计算结果不同的是, 同步比对法最大互差为 4.51 nT, 而最小二乘拟合法的最大互差为 9.10 nT. 由此可见, 对于分站 C 而言, 由于 A 站和 C 站距离较远, 并且日变性质差异较大, 因此造成的在不同时段内归算参数却出现较大差异, 即归算参数具有一定的时变性, 由此归算出的日变基值结果变化也较大, 此时, 同步比对法要优于最小二乘拟合法.

综合比较 B 站和 C 站计算结果, 不难发现, 站间距离越小, 分站日变基值归算值最大互差也越小, 说明归算方法在距离较小时归算值一致性更好. 站间距离较小时, 最小二乘拟合法归算结果要优于同步比对法归算结果(0.82 nT > 0.33 nT); 当站间距离较大时, 同步比对法归算结果则优于最小二乘拟合法归算结果(4.51 nT < 9.10 nT).

综合以上分析表明: 对于不同的日变性质, 应采取适当的多站日变基值传算方法, 可以有效地减小多站日变改正中因站间地磁日变基值差引起的整个测区磁场水平的差异, 提高远海区磁测地磁日变改正的精度.

## 4 结语

(1) 地磁日变对海洋磁力测量的影响与潮汐对

海洋水深测量的影响具有一定的相似性, 最小二乘拟合法建立在区域内站间日变化随平面位置呈线性变化的基础上, 将主站日变改正值幅值上进行伸缩, 时间(相位)上进行平移, 使得伸缩平移后主站与分站的日变改正值在最小二乘约束条件下残差平方和为最小, 以此为依据进行基值归算, 有效地减小了因站间地磁日变基值差引起的整个测区磁场水平的差异.

(2) 多站同步实测数据分析表明: 当主站和分站日变性质相似时, 最小二乘拟合法效果最好, 且对同步观测时段要求低. 当日变性质差异较大时, 同步比对法则效果优于最小二乘拟合法. 因此, 多站日变改正基值归算时, 应根据实际需要选择合适的归算方法.

(3) 最小二乘拟合法也可以应用于多站日变改正中的时差计算及日变改正值的内插, 提高远海区海洋磁力测量地磁日变改正的精度.

## References

- Auld D R, Law L K, Currie R G. 1979. Cross-over error and reference station location for a marine magnetic survey. *Marine Geophysical Researches*, 4(2): 167-179.
- Bian G, Liu Y C, Zhai G J. 2003. A method to determine the correction datum of the geomagnetic diurnal variation. *Hydrographic Surveying and Charting* (in Chinese), 23(5): 9-11.
- Bian G, Liu Y C. 2008. Marine magnetic survey data processing and its application (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Dalian: Dalian Naval Academy.
- Bian G, Liu Y C, Bian G L, et al. 2009. Research on computation method of multi-station diurnal variation correction in marine magnetic surveys. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(10): 2613-2618.
- Bian G L, Liu Y C, Zhai G J, et al. 2009. Base value reduction methods with multi-station diurnal variation correction in marine magnetic survey. *Hydrographic Surveying and Charting* (in Chinese), 29(6): 5-8.
- DZ/T 0142-94. 1995. Techno-specification for avigation magnetic survey (in Chinese). Beijing: Chinese Geologic Mineral Department.
- Gao J Y, Liu Q, Zhai G J, et al. 2009. Processing of secular variation and disturbance related to marine geomagnetic diurnal variation correction. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 31(4): 87-91.
- GB/T13909-92. 1993. Specification for oceanographic survey-marine geology and geophysics investigation (in Chinese). Beijing: National Technology Supervised Department.
- GJB. 7537-2012. 2012. Specification for marine magnetic survey (in Chinese). Beijing: The Military Standard Publication Department of

- PLA.
- Guan Z N. 2005. Geomagnetic Field and Magnetic Prospecting (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.
- Guo J H, Xue D J. 1999. Research on computation method and application of multi-station diurnal variation Correction. *Journal of Earth* (in Chinese), 20(Suppl): 932-937.
- Han J P. 1994. Base value determination in high-precision magnetic diurnal variation. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 18(6): 476-477.
- Liang K L, Liu Y C, Guan Z, et al. 1996. Marine gravity and magnetic Survey (in Chinese). Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping.
- Liu Y C. 2003. The spatial constructor of the marine sounding and data processing (in Chinese). Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping.
- Liu Y C, Xiao F M, Bao J Y, et al. 2006. Introduction to hydrography (in Chinese). Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping.
- Qi G Z. 1975. A method for the analysis of geomagnetic daily variation in a local area and the longitudinal effect of the  $S_q$ -Field in China. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 18(2): 104-117.
- Riddihough R P. 2002. Diurnal corrections to magnetic surveys—An assessment of errors. *Geophysics Prospecting*, 19(4): 551-567.
- Wang L, Bian G, Ren L P, et al. 2011. Analyze on influence of time difference in geomagnetic diurnal variation correction. *Hydrographic Surveying and Charting* (in Chinese), 31(6): 39-41.
- Whellams J W. 1996. Spatial in homogeneity of geomagnetic fluctuation fields and their influence on high resolution aeromagnetic surveys[D]. Flinders: Flinders University.
- Xu W Y. 2003. Geomagnetism (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- Xu X, Liao K X, Chen B Y, et al. 2007. The effect analysis of the observed diurnal magnetic variation from multi-stations on the accuracy of marine magnetic survey. *Hydrographic Surveying and Charting* (in Chinese), 27(1): 38-40.
- Yuan J S, Liang F, Guan Y M, et al. 2003. Research on effect of geomagnetic field time-space difference to geomagnetic survey precision. *Seismological Research of Northeast China* (in Chinese), 19(2): 41-45.

## 附中文参考文献

- 边刚, 刘雁春, 翟国君. 2003. 一种确定地磁日变改正基值的方法. *海洋测绘*, 23(5): 9-11.
- 边刚, 刘雁春, 卞光浪等. 2009. 海洋磁力测量中多站地磁日变改正值计算方法研究. *地球物理学报*, 52(10): 2613-2618.
- 卞光浪, 刘雁春, 翟国君等. 2009. 海洋磁力测量中多站地磁日变改正基值归算. *海洋测绘*, 29(6): 5-8.
- DZ/T 0142-94. 1995. 航空磁测技术规范. 北京: 中华人民共和国地质矿产部.
- 高金耀, 刘强, 翟国君等. 2009. 与海洋地磁日变改正有关的长期变化和磁扰的处理. *海洋学报*, 31(4): 87-91.
- GB/T13909-92. 1993. 海洋调查规范·海洋地质地球物理调查. 北京: 国家技术监督局.
- GJB. 7537-2012. 2012. 海洋磁力测量要求. 北京: 中国人民解放军总装备部军标出版发行部.
- 管志宁. 2005. 地磁场与磁力勘探. 北京: 地质出版社.
- 郭建华, 薛典军. 1999. 多站式地磁日变校正方法研究及应用. *地球学报*, 20(增刊): 932-937.
- 韩建平. 1994. 关于高精度磁测日变改正中的基值( $T_0$ )确定问题. *物探与化探*, 18(6): 476-477.
- 梁开龙, 刘雁春, 管铮等. 1996. 海洋重力测量与磁力测量. 北京: 测绘出版社.
- 刘雁春. 2003. 海洋测深空间结构及其数据处理. 北京: 测绘出版社.
- 刘雁春, 肖付民, 暴景阳等. 2006. 海道测量学概论. 北京: 测绘出版社.
- 祁贵仲. 1975. 局部地区地磁日变分析方法及中国地区  $S_q$  场的经度效应. *地球物理学报*, 18(2): 104-117.
- 王磊, 边刚, 任来平等. 2011. 时差对海洋磁力测量地磁日变改正的影响分析. *海洋测绘*, 31(6): 39-41.
- 徐文耀. 2003. 地磁学. 北京: 地震出版社.
- 徐行, 廖开训, 陈邦彦等. 2007. 多站式地磁日变观测数据对远海磁测精度的影响分析. *海洋测绘*, 27(1): 38-40.
- 袁景山, 梁放, 关英梅等. 2003. 地磁场时空差异对磁测精度影响的探讨. *东北地震研究*, 19(2): 41-45.

(本文编辑 张正峰)