

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006281

自动磁通门经纬仪多参量误差补偿算法*

张策^{1,2}, 滕云田¹, 张涛¹, 范晓勇¹, 汤一翔¹

(1. 中国地震局地球物理研究所 北京 100081; 2. 中国地震局地壳应力研究所 北京 100085)

摘要:自动磁通门经纬仪是地磁绝对观测中测量磁偏角和磁倾角的重要仪器,在测量过程中目前存在横轴与磁轴的不正交误差、磁通门传感器零点偏移误差、电机停止误差和竖轴倾斜误差。为了提高仪器测量精度,利用多体系统理论建立了磁通门传感器输出模型,并基于该模型和“四位置测量法”提出了磁偏角和磁倾角的多参量误差补偿算法。补偿算法通过传感器指向与地磁矢量正交的4个特定位置进行测量,可消除不正交误差和传感器零偏。针对测量过程中存在的电机停止误差和竖轴倾斜误差,补偿算法可进行修正。利用模拟数据进行的仿真实验表明,补偿算法可对 $\pm 10'$ 以内的电机停止误差和竖轴倾斜误差进行补偿。在台站完成的实测实验表明,补偿算法使测量误差减小到 $3''$ 以内,满足仪器测量的需求。

关键词:磁通门经纬仪;地磁偏角;地磁倾角;误差补偿;多体理论

中图分类号: TH762 P318.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.20 510.99

Multi-parameter error compensation algorithm for automatic fluxgate theodolite

Zhang Ce^{1,2}, Teng Yuntian¹, Zhang Tao¹, Fan Xiaoyong¹, Tang Yixiang¹

(1. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China; 2. Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China)

Abstract: The automatic fluxgate theodolite is an important instrument for measuring the geomagnetic declination and geomagnetic inclination in the absolute observation of geomagnetism. There are non-orthogonal errors of the horizontal axes and magnetic axes, zero offset error of the fluxgate sensor, motor stop deviation and vertical axis tilt deviation during the measurement. In order to improve the measurement accuracy of the instrument, the multi-body system theory is used to establish the output value model of the fluxgate sensor in this paper. Based on the model and the "four-position measurement method", the multiple parameter error compensation algorithm for magnetic declination and inclination is proposed. The compensation algorithm performs measurement through the sensor pointing to four specific positions perpendicular to the geomagnetic vector, which can eliminate non-orthogonal error and sensor zero offset. The compensation algorithms can effectively correct the motor stop deviation and vertical axis tilt deviation during the measurement process. Simulation experiments on simulation data show that the algorithm can effectively compensate the motor stop error and vertical axis tilt error within $\pm 10'$. The actual measurement experiments completed at the geomagnetic station show that the compensation algorithm reduces the measurement error to within $3''$ and meets the instrument measurement requirements.

Keywords: fluxgate theodolite; geomagnetic declination; geomagnetic inclination; error compensation; multibody theory

0 引言

地磁要素是表示地球磁场大小和方向的物理量,主要要素有水平分量、北分量、东分量、垂直分量、磁偏角(magnetic declination, D)、磁倾角(magnetic inclination, I)

和总场强^[1],以上7个要素,仅知道其中任意3个要素就可以推算出其他要素。地磁台站的绝对观测,主要是指对磁偏角、磁倾角和总场强的观测,本文仅限于讨论磁偏角和磁倾角的观测。目前磁偏角和磁倾角主要使用人工磁通门经纬仪进行观测,这两要素是地磁台站仅存的没有实现自动化测量的观测要素,因此非常有必要研制自动磁通门经纬仪来攻克这一技术瓶颈,进而实现地磁绝

对观测的全面无人化。自动磁通门经纬仪的研制也可以解决目前人工观测对人员素质要求高和人工磁通门经纬仪已经停产的难题。

目前国际上已经有相关科研机构展开了自动磁通门经纬仪的研制工作。德国布伦瑞克工业大学 Auster 团队于 2003 年完成了绝对地磁观测系统 (geomagnetic automated system, GAUSS) 的开发^[2], 并完成了台站观测实验。“GAUSS”采用间接法测量, 仪器需要配备三分量磁通门传感器, 通过欧拉变换间接获取地磁矢量方向。该仪器使用冗余法多次测量磁场数据, 利用最小二乘法获得的最优解补偿测量结果, 测量误差优于 4"。由于该方案使用的微型高精度三分量传感器结构复杂且难以批量生产, 目前已停止后续研究。比利时皇家气象学院于 2004 年开始自动化绝对地磁观测系统的研发, 并于 2006 年发布了代号为“AutoDIF”的实验样机^[3-4]。2017 年, 比利时皇家气象学院在南极 Livingston 岛开展绝对地磁观测实验^[5-6], 并为此研发了“GyroDIF”实验样机^[7-9]。“AutoDIF”和“GyroDIF”采用直接法测量, 仪器配备的单分量磁通门传感器在水平面内和磁子午面内连续旋转多次获取传感器零值位置, 通过平均算法减小测量误差。上述仪器均配备单轴电子水泡, 可实现自动水平补偿, 最终测量误差控制到 6"以内。该方案的优点是测量精度较高, 但对仪器制造和装配要求很高, 难以控制仪器成本。

国内目前仅有中国地震局地球物理研究所开展了自动磁通门经纬仪的研究工作, 本文主要研究该仪器的测量误差补偿算法。该仪器配备单分量磁通门传感器, 采用“近零法”测量, 即在传感器零值位置附近采集数据, 通过误差补偿^[10-12]提高测量精度。本方案的优点是仪器结构简单, 成本可控, 有利于推广应用。本文首先以多体系统理论为基础建立了磁通门传感器输出模型, 然后基于该模型讨论了磁偏角和磁倾角的“四位置测量法”^[13], 提出了适用于自动磁通门经纬仪的多参量误差补偿算法。最后利用模拟数据对补偿算法进行了仿真验证, 并在绝对地磁观测台站完成实测实验。

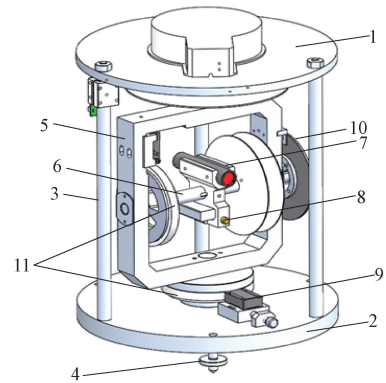
1 理论分析

自动磁通门经纬仪采用“四位值测量法”解决磁偏角和磁倾角的测量补偿问题。本节基于多体系统理论^[14-15]对传感器输出进行建模^[16-17], 并结合“四位置测量法”讨论补偿算法。

1.1 仪器结构及工作原理

自动磁通门经纬仪采用“框架式”二自由度转台结构, 整机可分为外框、旋转框和横轴系统 3 大部分。图 1 所示为自动磁通门经纬仪虚拟样机。旋转框可以绕仪器中心的竖轴作水平旋转运动。旋转框中部安装有可纵向

转动的横轴系统, 磁通门传感器和激光器安装在横轴中部。其设计优点是: 横轴和竖轴都采用两端轴承支撑, 结构刚度大, 旋转精度高。无磁压电电机和光栅码盘分别安装在旋转轴两端, 可为仪器中心的磁通门传感器和激光器提供更大的安装空间。



注: 1. 上底板, 2. 下底板, 3. 立柱, 4. 调节脚, 5. 旋转框, 6. 横轴, 7. 激光器, 8. 磁通门传感器, 9. 压电电机, 10. 光栅码盘, 11. 陶瓷环。

图 1 自动磁通门经纬仪结构

Fig. 1 Automatic fluxgate theodolite structure diagram

磁通门传感器是自动磁通门经纬仪的核心传感器, 具有方向性强的特点^[18]。当外磁场方向与磁通门传感器磁轴方向正交时, 磁通门检测器输出为 0。仪器测量磁偏角时, 首先将磁通门传感器置平, 然后旋转竖轴, 在水平面内寻找磁通门传感器与地磁矢量水平投影正交位置, 从而确定地磁矢量的方位角。测量磁倾角时, 将磁通门传感器旋转至磁子午面内, 转动横轴, 在磁子午面内寻找传感器与地磁矢量正交的位置, 从而确定地磁矢量的俯仰角。

1.2 多体系统理论

多体系统理论是用来对多体系统进行拓扑结构描述的理论, 该理论的低序体系列法是用来描述多体系统拓扑结构关联的有效方法。在多体系统中, 任选一个物体 B_1 , 然后沿远离 B_1 的方向, 依增长顺序标定每个物体的序号, 从系统的一个分支到另一个分支, 直至全部物体标定完毕, 如图 2 所示。该多体系统中任一个物体可称为 B_k , 设 T 是低序体算子, 当 B_j 是 B_k 的相邻低序体时, 有 $B_k = TB_j$ 。

自动磁通门经纬仪属于“开环链式”结构, 该结构十分适合使用多体系统理论来描述各部件的运动关系。仪器的底座、竖轴、横轴和传感器可以看作多体理论中的研究物体, 各个部件之间的联接关系可使用一系列算子描述。在实际计算中, 这些算子被系列化的变换矩阵代替。

1.3 磁通门传感器输出建模

磁通门传感器输出模型是地磁矢量在传感器坐标系

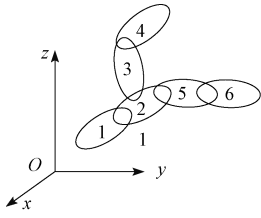


图 2 多体系统拓扑结构

Fig. 2 Multibody system topological structure

的数学表达。该模型是补偿算法的基础,其建立过程是借助系列算子(变换矩阵)将地磁矢量从环境坐标系转换到传感器坐标系的过程。

1) 坐标系建立

在多体系统理论中,仪器的位置参数和误差参数被抽象为一系列齐次坐标。传感器输出模型,可以用齐次坐标表达的位置矩阵和误差矩阵的乘积表示。参考该理论,可将仪器划分为底座坐标系 1、竖轴坐标系 2、横轴坐标系 3 和传感器坐标系 4,环境坐标系设为 0。为简化计算,假定底座安装稳固且不变,这样可以将环境 0 和底座 1 合并考虑。对应的坐标系设定分别为:仪器底座坐标系 $C_1(0,0,k)$,竖轴坐标系 $C_2(0,0,r)$,横轴坐标系 $C_3(0,0,m)$,传感器坐标系 C_4 。上述的 k, r, m 分别代表各个坐标系原点偏移量。对应坐标系的位置和设定方向如图 3 所示。

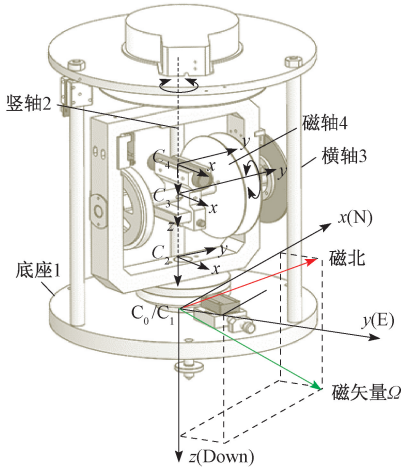


图 3 仪器坐标系建立

Fig. 3 Instrument coordinate system establishment

2) 变换矩阵

变换矩阵是将地磁矢量从环境坐标系变换到传感器坐标系的计算单元,可将仪器多个误差参量引入补偿算法。从 C_1 到 C_4 的总体变换矩阵设为 T_a 。在多体理论中, T_a 包含了位置变换矩阵、运动变换矩阵、位置误差变换矩阵和运动误差变换矩阵。

位置变换矩阵代表仪器各部件尺寸,运动变换矩阵代表各部件角度姿态。从 C_1 到 C_4 的变换矩阵乘积,表示地磁矢量从环境坐标系到传感器坐标系的空间变换和姿态变换。两种变换矩阵都使用齐次坐标表示, C_1 到 C_2 、 C_2 到 C_3 和 C_3 到 C_4 的位置变换矩阵和运动变换矩阵分别设为 $T_{12,p}$ 和 $T_{12,s}$ 、 $T_{23,p}$ 和 $T_{23,s}$ 、 $T_{34,p}$ 和 $T_{34,s}$ 。

位置误差变换矩阵代表仪器各部件加工误差,运动误差变换矩阵代表各部件转动定位误差。这两种变换矩阵可将误差参数引入计算过程。 C_1 到 C_2 、 C_2 到 C_3 和 C_3 到 C_4 的位置误差变换矩阵和运动误差变换矩阵分别设为 $T_{12,pe}$ 和 $T_{12,se}$ 、 $T_{23,pe}$ 和 $T_{23,se}$ 、 $T_{34,pe}$ 和 $T_{34,se}$ 。总体变换矩阵 T_a 的表达式为:

$$T_a = T_{34,se} T_{34,s} T_{34,pe} T_{34,p} T_{23,se} T_{23,s} T_{23,pe} T_{23,p} \times T_{12,se} T_{12,s} T_{12,pe} T_{12,p} = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\varepsilon & 0 \\ -\gamma & 1 & 0 & 0 \\ \varepsilon & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & E & -F & 0 \\ -E & 1 & K & 0 \\ F & -K & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -M & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ M & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & G & 0 & 0 \\ -G & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & -A & 0 \\ 0 & 1 & B & 0 \\ A & -B & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: φ 是仪器竖轴的理论转角,用于磁偏角的测量; β 是仪器横轴的理论转角,用于磁倾角的测量; B 是竖轴绕 x 轴不垂直误差; A 是竖轴绕 y 轴不垂直误差; γ 是传感器坐标系 C_4 与横轴坐标系 C_3 在水平方向的不正交误差; ε 是 C_4 与 C_3 在竖直方向的不正交误差; E 是横轴绕 z 轴晃动误差, F 是横轴绕 y 轴晃动误差, K 是横轴圆光栅编码器误差; M 是横轴倾斜误差; G 是竖轴圆光栅编码器误差。

考虑到地磁矢量存在于整个空间,在小范围区域内可认为是平行量,此处忽略平移矩阵 $T_{12,p}$ 、 $T_{23,p}$ 、 $T_{34,p}$ 的影响。由于现代圆光栅码盘定位精度可以达到亚秒级,为进一步减少系统自由度,简化计算,这里忽略圆光栅编码器误差 K, G 的影响。此外,现代高精度机加工误差很小,可近似认为竖轴和横轴严格正交,忽略 E, F 和 M 的影响。经过上述一系列简化,可得:

$$T_a = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\varepsilon & 0 \\ -\gamma & 1 & 0 & 0 \\ \varepsilon & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -A & 0 \\ 0 & 1 & B & 0 \\ A & -B & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3) 磁通门传感器输出模型

设地磁矢量 Ω 在 C_1 中的坐标为 $[\Omega_x \ \Omega_y \ \Omega_z]^T$, Ω 在水平面的投影方向即为地磁北的方向, 该投影与 x 轴(地理北)的夹角即磁偏角 D 。 Ω 在 C_4 中 x 轴上的投影即磁通门传感器的输出值 S 。 S 也可以理解为 Ω 在 C_4 中的单位矢量 $\lambda = [1 \ 0 \ 0]^T$ 上的投影。

$$S = \Omega_{C_4} \lambda_{C_4} + S_0 \quad (3)$$

式中: S_0 是磁通门传感器零偏; $\lambda_{C_4} = \lambda$, Ω_{C_4} 是 Ω 在 C_4 中的坐标。

$$\Omega_{C_4} = T_a \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{pmatrix} = T_a \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

综上所述, 传感器输出 S 的表达式为:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\varepsilon & 0 \\ -\gamma & 1 & 0 & 0 \\ \varepsilon & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -A & 0 \\ 0 & 1 & B & 0 \\ A & -B & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + S_0 \quad (5)$$

1.4 磁偏角的补偿算法

通过传感器输出模型无法直接获得磁偏角和磁倾角。获取磁偏角, 一般采用“四位置测量法”。该方法是将磁通门传感器置水平位置(横轴转角 $\beta \approx 0$ 或 π), 然后在水平面内寻找传感器与地磁矢量投影的 4 个正交位置(传感器零值位置)。

由地磁要素的关系可知, $\Omega_x = H \cos D$, $\Omega_y = H \sin D$, $\Omega_z = Z$, 代入式(5), 可得:

$$S = -H y \sin(\varphi - D) + H(\cos\beta - \varepsilon \sin\beta) \cos(\varphi - D) - H(\sin\beta + \varepsilon \cos\beta)(A \cos D - B \sin D) + Z \gamma (A \sin\varphi + B \cos\varphi) + Z(-A \cos\varphi + B \sin\varphi)(\cos\beta - \varepsilon \sin\beta) - Z(\sin\beta + \varepsilon \cos\beta) +$$

$$S_0 \quad (6)$$

式中: H 、 Z 分别是地磁矢量的水平分量和垂直分量。

“四位置测量法”过程如下:

1) 位置 1: 磁通门传感器水平正置, 传感器指东, 即

$$\beta \approx 0 \text{ 且 } (\varphi - D) \approx \frac{\pi}{2};$$

2) 位置 2: 磁通门传感器水平正置, 传感器指西, 即

$$\beta \approx 0 \text{ 且 } (\varphi - D) \approx \frac{3\pi}{2};$$

3) 位置 3: 磁通门传感器水平倒置, 传感器指西, 即

$$\beta \approx \pi \text{ 且 } (\varphi - D) \approx \frac{3\pi}{2};$$

4) 位置 4: 磁通门传感器水平倒置, 传感器指东, 即

$$\beta \approx \pi \text{ 且 } (\varphi - D) \approx \frac{\pi}{2}.$$

对应于以上 4 个位置, 传感器输出值表达式为:

$$S_i \approx j H \gamma + k H \left[p \frac{\pi}{2} + j(\varphi_i - D) \right] + k Z (-A \cos\varphi_i + B \sin\varphi_i) - Z(\beta_i + k \varepsilon) + S_0 \quad (7)$$

式中: S_i 分别代表 $S_1 \sim S_4$, S_i 均对三角函数进行了近似处理, 同时舍弃了微量, 如 γA 、 εB 等。另外, 由于电机存在停止误差, 所以 β 和 $(\varphi - D)$ 均是近似值。参数 i 、 j 、 k 和 p 的值如表 1 所示。

表 1 公式参数(测量磁偏角)

Table 1 Formula parameters (measuring geomagnetic declination)

i	j	k	p
1	-1	1	1
2	1	1	-3
3	1	-1	-3
4	-1	-1	1

将 $S_1 \sim S_4$ 联立, 可得磁偏角补偿公式。

$$D = -[A(-\cos\varphi_1 + \cos\varphi_2 + \cos\varphi_3 - \cos\varphi_4) + B(\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2 - \sin\varphi_3 + \sin\varphi_4)] \frac{Z}{4H} - \left[\sum_{i=1}^4 (-1)^i \beta_i \right] \frac{Z}{4H} + \left[\sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} S_i \right] \frac{1}{4H} + \left(\sum_{i=1}^4 \frac{\varphi_i}{4} \right) - \pi \quad (8)$$

式中: 第 1 分项部分是倾角传感器对磁偏角进行的校正, 校正值与竖轴转角 φ 有关; 第 2 分项部分是横轴偏移角对磁偏角进行的校正。人工测量时横轴是锁定的, 测量人员假定 β 不变, 自动测量时, 控制系统可以实时监测 β 值, 防止机构震动引起横轴角度偏移; 第 3 分项部分是电机停止误差对磁偏角进行的校正。由于电机 PID 特性和

转动机构惯性,磁通门传感器很难停止在输出恰好为零的位置,该分项是对电机停止位置的修正;第 4 分项部分是理想情况下的 4 个位置平均值,不含误差因素在内。

1.5 磁倾角的补偿算法

磁倾角的测量同样采用“四位置测量法”,不同之处是使磁通门传感器在磁子午面内旋转,寻找磁通门传感器零值点位置,此时 $(\varphi - D) \approx 0$ 或 π 。

由地磁要素的关系可知, $\Omega_x = F \cos I \cos D, \Omega_y = F \cos I \sin D, \Omega_z = F \sin I$, 输出值 S 可表示为:

$$\frac{S - S_0}{F} = \cos I (\cos \beta - \varepsilon \sin \beta) \cos(\varphi - D) -$$

$$\cos I \sin \beta (A \cos D - B \sin D) + \gamma \sin I (A \sin \varphi + B \cos \varphi) + \sin I \cos \beta (-A \cos \varphi + B \sin \varphi) - \sin I (\sin \beta + \varepsilon \cos \beta) \quad (9)$$

式中: F 是地磁矢量总场值。

“四位置测量法”过程如下:

1) 位置 1: $(\varphi - D) \approx 0$ 且 $\beta \approx \frac{\pi}{2} - I$;

2) 位置 2: $(\varphi - D) \approx 0$ 且 $\beta \approx \frac{3\pi}{2} - I$;

3) 位置 3: $(\varphi - D) \approx \pi$ 且 $\beta \approx I - \frac{\pi}{2}$;

4) 位置 4: $(\varphi - D) \approx \pi$ 且 $\beta \approx I + \frac{\pi}{2}$ 。

对应于以上 4 个位置,传感器输出值表达式为:

$$\frac{S_i - S_0}{F} = j \cos(\beta_i + jI) + p \varepsilon \sin(\beta_i + jI) -$$

$$\sin \beta_i \cos I (A \cos D - B \sin D) + \gamma \sin I (A \sin \varphi_i + B \cos \varphi_i) + \sin I \cos \beta_i (-A \cos \varphi_i + B \sin \varphi_i) \quad (10)$$

式中: S_i 代表的 $S_1 \sim S_4$ 同样对三角函数进行了近似处理。参数 i, j 和 p 的值如表 2 所示。

表 2 公式参数(测量磁倾角)

Table 2 Formula parameters (measuring geomagnetic inclination)

i	j	p
1	1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	-1	1

将 $S_1 \sim S_4$ 联立,同时考虑到 $\beta_1 + I \approx \frac{\pi}{2}, \beta_2 + I \approx$

$\frac{3\pi}{2}, \beta_3 - I \approx -\frac{\pi}{2}, \beta_4 - I \approx \frac{\pi}{2}$, 可得磁倾角补偿公式为:

$$I = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4}(-\beta_1 - \beta_2 + \beta_3 + \beta_4) - \frac{S_1 - S_2 - S_3 + S_4}{4F} +$$

$$\frac{H}{4F}(A \cos D - B \sin D)(-\sin \beta_1 + \sin \beta_2 + \sin \beta_3 - \sin \beta_4) +$$

$$\frac{Z}{2F} [(-A \cos \varphi_1 + B \sin \varphi_1)(\cos \beta_1 - \cos \beta_2) + (-A \cos \varphi_3 +$$

$$B \sin \varphi_3)(\cos \beta_3 + \cos \beta_4)] \quad (11)$$

式中:第 1 分项部分是常值,用于调整起始刻度;第 2 分项部分是理想情况下 4 个位置的平均值,不含误差因素在内;第 3 分项部分是电机停止误差对磁倾角的校正;最后 2 个分项部分是倾角传感器对磁倾角的校正。

2 仿真实验

算法对测量结果的补偿效果,可以采用向测量中间变量加入模拟偏差的方法进行验证。验证时,可以对单个中间变量加入偏差判断补偿效果,也可以对多个中间变量同时加入偏差判断补偿效果。

2.1 仿真的准备

仿真用数据来自河北省邯郸市涉县地震台地磁绝对观测数据。以该台 2017 年 12 月 1 日实测数据为例,地磁场 7 要素数值如表 3 所示。基于该组实测数据展开模拟测量来验证补偿算法,所涉及的中间变量如表 4 所示。

表 3 地震台实测数据

Table 3 Seismic station observation data

变量	值	单位	备注
D	-322.070	(')	磁偏角
I	3 312.850	(')	磁倾角
H	30 325.200	nT	地磁场水平分量
F	53 154.600	nT	地磁场总场强
X	30 192.300	nT	地磁场北分量
Y	-2 836.900	nT	地磁场东分量
Z	43 655.400	nT	地磁场垂直分量

表 4 模拟测量时涉及的中间变量

Table 4 Intermediate variables involved in simulation measurement

参数	磁偏角 D 的测量		磁倾角 I 的测量	
	数值	备注	数值	备注
φ_1	5 077.930'	$D+90^\circ$	-322.070'	D
φ_2	15 877.930'	$D+270^\circ$	-322.070'	D
φ_3	15 877.930'	$D+270^\circ$	10 477.930'	$D+180^\circ$
φ_4	5 077.930'	$D+90^\circ$	10 477.930'	$D+180^\circ$
β_1	-	-	2 087.150'	$90^\circ - I$
β_2	-	-	12 887.150'	$270^\circ - I$
β_3	-	-	-2 087.150'	$I - 90^\circ$
β_4	-	-	8 712.850'	$I + 90^\circ$
A	0		0	

验证方式为:首先向测量中间量 $\varphi_1 \sim \varphi_4, \beta_1 \sim \beta_4, A$ 和 B 加入一定范围的偏差,模拟测量过程中产生的电机停止误差和竖轴倾斜误差;然后计算偏差下获得的传感器输出值;最后将以上各个中间值代入磁偏角、磁倾角补偿公式计算偏差下测得的 D 和 I ,与地磁台实测 D 和 I 进行比较,以此判断补偿算法是否有效。

2.2 磁倾角补偿算法验证

测量磁偏角的过程中,涉及的中间变量有竖轴电机4次零值点停止位置 $\varphi_1 \sim \varphi_4$,以及竖轴倾斜误差 A 和 B 。考虑到三维图像能展现的变量参数仅有两个,这里仅以 φ_1, φ_2 为例,当给两变量同时加入模拟误差 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ 时,利用磁偏角补偿公式计算出磁偏角,然后与台站实测磁偏角比较,得到补偿后的误差。

在未采用补偿算法的情况下,磁偏角将按照式(12)计算。

$$D = \left(\sum_{i=1}^4 \frac{\varphi_i}{4} \right) - \pi \quad (12)$$

当 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ 在 $-30' \sim 30'$ 变化时,磁偏角的测量误差范围达到 $-900'' \sim 900''$ 。采用补偿算法后, $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ 在同样范围内变化时,磁偏角的补偿后误差如图4所示。从图4可以看出,在存在电机停止误差 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ 的情况下,磁偏角补偿后测量误差均小于 $1''$,满足地磁台站磁偏角观测精度 $6''$ 的测量要求。由此可见,在实际测量中,电机可以停在磁通门传感器理论零值点位置附近 $\pm 30'$ 范围内的任一位置(近零位置)而不影响测量精度。补偿算法的优点是减少电机位置调整时间,提高测量效率。当给其他中间变量加入模拟偏差时,可以获得同样的补偿效果。

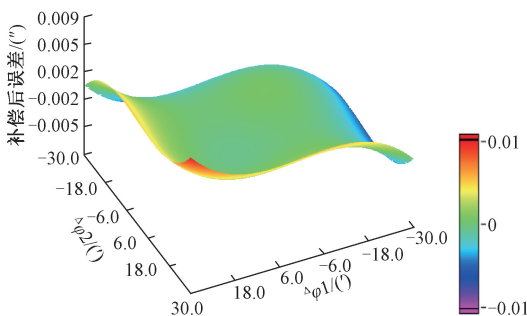


图4 电机停止误差 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ 对应的磁偏角补偿后误差
Fig. 4 Compensated error of geomagnetic declination corresponding to motor stop error $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$

2.3 磁倾角补偿算法验证

测量磁倾角的过程中,涉及的中间变量有竖轴电机4次零值点停止位置 $\varphi_1 \sim \varphi_4$,横轴电机4次零值点停止位置 $\beta_1 \sim \beta_4$,以及 A 和 B 。以 β_1, β_2 为例,当给两变量同时加入模拟偏差 $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2$ 时,利用磁倾角补偿公式计算

出磁倾角,然后与台站实测磁倾角比较,得到补偿后的误差。

在未采用补偿算法的情况下,磁倾角将按照式(13)计算。

$$I = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4}(-\beta_1 - \beta_2 + \beta_3 + \beta_4) \quad (13)$$

当 $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2$ 在 $-30' \sim 30'$ 变化时,磁倾角的测量误差范围达到 $-900'' \sim 900''$ 。采用补偿算法后, $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2$ 在同样范围内变化时,磁倾角的补偿后误差如图5所示。从图5可以看出,在存在电机停止误差 $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2$ 的情况下,磁倾角补偿后测量误差均小于 $1''$,满足地磁台站磁倾角观测精度 $6''$ 的测量要求。因此在实际测量磁倾角时,电机只需停在零值点位置 $\pm 30'$ 范围内即可。

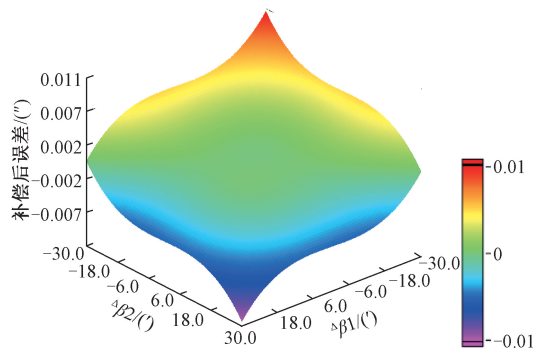


图5 电机停止误差 $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2$ 对应的磁倾角补偿后误差
Fig. 5 Compensated error of geomagnetic inclination corresponding to motor stop error $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2$

2.4 存在多种误差的补偿验证

磁偏角和磁倾角的补偿算法验证仅涉及了其中两项中间变量,当给多个中间变量同时加入偏差时,将使补偿算法的适用角度范围变小,但这种情况更符合实际工作状况。

通过误差仿真计算,在多种误差存在的情况下,磁偏角和磁倾角的补偿算法可以在 $\pm 10'$ 的范围内(包含电机停止误差和竖轴倾斜误差)对测量结果进行补偿,补偿后测量误差不超过 $1''$ 。

表5所示给出了存在多种误差的情况下,磁偏角和磁倾角的补偿后误差。表中的模拟偏差用 ΔX 表示,数值由随机数产生,范围为 $-10' \sim 10'$ 。从表5的结果可以看出,补偿后测量误差均不超过 $1''$,满足地磁台站的观测要求。

2.5 结果分析

从磁偏角、磁倾角补偿算法和仿真实验可以得出以下结论:

1) 补偿算法的计算公式不含磁轴与横轴的不正交误差和传感器零点偏移误差,这两个误差因素的消除

表 5 存在多种误差的补偿结果

Table 5 Compensation results with multiple errors existing

参数	磁偏角的测量	磁倾角的测量
$\Delta\varphi_1$	5.32'	2.85'
$\Delta\varphi_2$	-6.19'	2.85'
$\Delta\varphi_3$	2.24'	4.51'
$\Delta\varphi_4$	-6.67'	4.51'
$\Delta\beta_1$	-	6.13'
$\Delta\beta_2$	-	2.34'
$\Delta\beta_3$	-	-7.96'
$\Delta\beta_4$	-	1.05'
ΔA	6.32'	-7.55'
ΔB	8.86'	1.57'
补偿后测量值	-322.068'	3 312.855'
补偿后误差	0.12"	0.30"

可降低仪器加工和装配的难度。

2) 补偿算法中的传感器输出值均在近零位置测得,可提高测量效率。如果传感器的输出线性且格值经过严格标定,当传感器接近零值时可以利用磁场水平分量、垂直分量和总场值通过补偿算法获得精确的零值位置。

3) 采用补偿算法后,仪器在测量前可以不严格调整竖轴垂直。仪器配置的高精度倾角传感器可以实时获取竖轴倾角,并对传感器输出进行补偿。

4) 近零位置测量虽然可提高测量效率,但考虑到传感器格值存在线性误差和三角函数近似范围,应该使传感器尽可能接近零值位置以保证测量精度。

3 实测实验

为了对磁偏角和磁倾角的补偿算法进行实际观测验证,将自动磁通门经纬仪安装到涉县地震台绝对地磁观测室的仪器墩上进行实测实验,如图 6 所示。考虑到夜间磁场干扰小,电磁环境较好,测试选择在晚上 10 时进行。测试时先观测磁偏角,后观测磁倾角。实验自 2019 年 5 月 1 日开始,持续 20 d。由于参与测试的自动磁通门经纬仪属于样机阶段,未与台站仪器统一地理北参考标志,因此其磁偏角测量结果存在固定角度差(约 2'),该差值可视为系统差,不计入测量误差。为了验证补偿效果,磁通门传感器数据都在近零位置测量(即电机停在零值位置 $\pm 10'$ 以内)。测量前,仪器竖轴不严格调垂直,倾斜误差控制到 $\pm 10'$ 以内。

获得的磁偏角基线图如图 7 所示,台站数据作为标准参考数据。在测试记录数据中,未使用补偿算法的测量磁偏角与标准值的最大误差为 8.85",超出了地磁台站

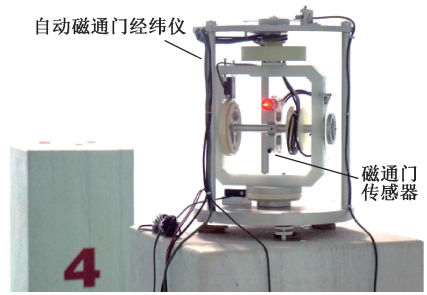


图 6 台站实测实验

Fig. 6 Station test experiment

规定的“误差不大于 6"”的测量要求;使用补偿算法后测量磁偏角与标准值的最大误差为 2.88",满足台站测量要求。

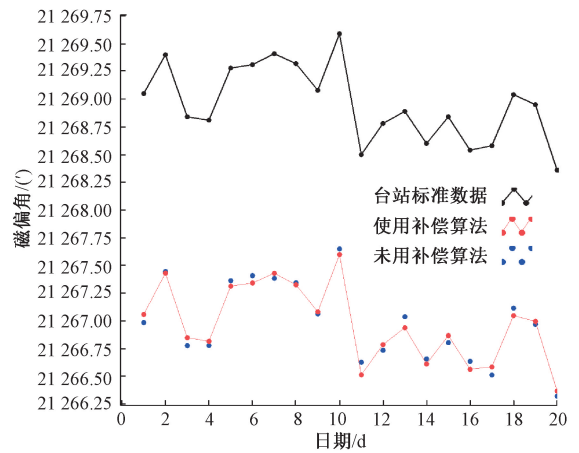


图 7 磁偏角测量基线

Fig. 7 Baseline of geomagnetic declination measurement

获得的磁倾角基线图如图 8 所示,同样以台站数据作为标准参考数据。在测试记录数据中,未使用补偿算法的测量磁倾角与标准值的最大误差为 8.57",超出了地磁台站的测量要求;使用补偿算法后最大误差为 1.78",符合台站测量要求。

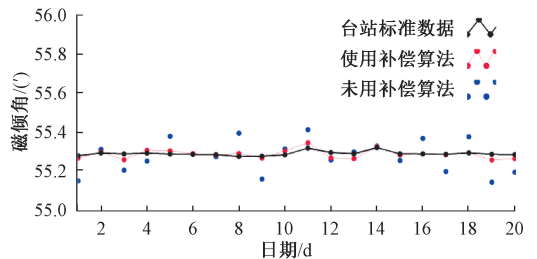


图 8 磁倾角测量基线

Fig. 8 Baseline of geomagnetic inclination measurement

实测结果可以说明,针对电机停止误差和竖轴倾斜

误差进行的补偿有效提高了测量精度。在测量时间上,使用补偿算法的程序完成单次测量耗时约 8 min,比未补偿的程序节省 4 min,补偿算法在满足测量精度的同时提高了测量效率。

4 结 论

本文利用多体系统理论建立了自动磁通门经纬仪输出模型,基于该模型和“四位位置测量法”提出了磁偏角和磁倾角的多参量误差补偿算法。本文算法可以消除磁通门传感器零点偏移误差和横轴与磁轴不正交误差,减小仪器加工和调整的难度,间接降低仪器制造成本,便于仪器推广应用。针对测量过程中存在的电机停止误差和竖轴倾斜误差,补偿算法可予以修正。由于磁通门传感器在近零位置采集数据,电机调整时间大幅减少,测量效率得到提高。仿真实验和实测实验的结果表明,在存在多种误差的情况下,该算法可以对 $\pm 10'$ 以内的电机停止误差和竖轴倾斜误差进行有效补偿。

自动磁通门经纬仪多参量补偿算法未来还将引入方位定向误差补偿和环境干扰误差补偿,进一步提高仪器测量精度,为该仪器的实用化提供技术方法支撑。

参考文献

- [1] 王晓美,滕云田,范晓勇,等. 基于 OVERHAUSER 效应磁探头的矢量磁场测量仪[J]. 仪器仪表学报,2018,39(8):91-97.
WANG X M, TENG Y T, FAN X Y, et al. Developed vector magnetometer based on OVERHAUSE effect sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(8): 91-97.
- [2] KORTE M, BRUNKE H P, BRONKALLA O, et al. Status of the geomagnetic automated system gauss [C]. XVth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, 2012: 20-23.
- [3] RASSON J, LOO S V, BERRAMI N. Automatic DI flux measurements with auto DIF [C]. XIIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, 2008. DOI: 10.13140/2.1.1469.4724.
- [4] GONSETTE A, RASSON J, MARIN J L. AutoDIF: automatic absolute DI measurements [C]. XVth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, 2012: 16-19.
- [5] GONSETTE A, RASSON J L, BRACKE S, et al. Fog-based automatic true north detection for absolute magnetic declination measurement [C]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2017: 439-446.
- [6] MARSAL S, CURTO J J, JOAN M T, et al. Automatic DI-flux at the Livingston island geomagnetic observatory, Antarctica: requirements and lessons learnt [C]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2017: 1-17.
- [7] GONSETTE A, RASSON J L, BRACKE S, et al. Automatic true north detection during absolute magnetic declination measurement [C]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2017. DOI: 10.5194/gi-2017-18.
- [8] PONCELET A, GONSETTE A, RASSON J. Several years of experience with automatic DI-flux systems: Theory, validation and results [C]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2017, 6(2): 353-360.
- [9] BRACKE S, GONSETTE A, RASSON J, et al. Automated observatory in Antarctica: Real-time data transfer on constrained networks in practice [J]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2017, 6(2): 285-292.
- [10] 李婷,张金生,王仕成,等. 地磁测量误差矢量补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(11):2682-2690.
LI T, ZHANG J SH, WANG SH CH, et al. Component compensation method for distortion magnetic field measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2682-2690.
- [11] 龙礼,黄家才. 基于递推最小二乘法的地磁测量误差校正方法 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (6): 1440-1446.
LONG L, HUANG J C. Recursive least square based online error calibration method in geomagnetic detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1440-1446.
- [12] 王福全,王珏,谢志江,等. 精密转台角分度误差补偿[J]. 光学精密工程,2017,25(8):2165-2172.
WANG F Q, WANG J, XIE ZH J, et al. Compensation of angular indexing error for precision turnable [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(8): 2165-2172.
- [13] 张涛,张策,滕云田,等. 地磁偏角倾角绝对测量技术发展现状综述 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (8): 80-87.
ZHANG T, ZHANG C, TENG Y T, et al. Review on the development of the automatic geomagnetic deflection and inclination observation instrument [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 80-90.
- [14] 范晋伟,陶浩浩,王鸿亮,等. 基于多体系统理论的机床建模与几何误差分析 [J]. 制造业自动化, 2016, 38(11):52-57.

FAN J W, TAO H H, WANG H L, et al. Modeling and geometric error analysis of machine tools based on multi-body system theory [J]. *Manufacturing Automachine*, 2016,38(11): 52-57.

- [15] 孙致月,赵世明. 基于多体系统理论的五轴转台误差建模与分析[J]. *机电工程技术*,2017,46(11):44-49.

SUN ZH Y, ZHAO SH M. Errors modeling and analysis of five-axis turntable based on multi-body system kinematics [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*,2017,46(11): 44-49.

- [16] 孙慧洁. 大型真空调试平台的设计及其误差建模分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

SUN H J. Structural design and error analysis of the large vacuum testing table [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2013.

- [17] 贾建援,柴伟,于大林,等. 方位俯仰转台误差参数辨识与指向精度分析[J]. *仪器仪表学报*,2016,37(7): 1500-1508.

JIA J Y, CHAI W, YU D L, et al. Error parameters identification and pointing accuracy analysis of an azimuth elevation turntable [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*,2016,37(7): 1500-1508.

- [18] 范晓勇,滕云田,周勋,等. 磁通门经纬仪磁传感器的研制[J]. *地震地磁观测与研究*,2012,33(1):81-87.

FAN X Y, TENG Y T, ZHOU X, et al. Research on the fluxgate sensor of magnetic fluxgate theodolite [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*,2012,33(1): 81-87.

作者简介



Zhang Ce received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Tianjian University in 2006 and 2008, respectively. Now, he is a Ph. D. candidate in Institute of Geophysics, CEA. His main research interest includes solid geophysics and automatic measurement.

张策,2006年和2008年于天津大学分别获得学士和硕士学位,现为中国地震局地球物理研究所博士研究生,主要研究方向为固体地球物理、自动化测量等。

E-mail:zhangceid@163.com



Teng Yuntian (通信作者) received his B. Sc.

E-mail:tengyt@cea-igp.ac.cn

degree from Beijing Institute of Technology in 1988, received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Institute of Geophysics, China Earthquake Administration in 1991 and 2000, respectively. Now, he is a research fellow and Ph. D. supervisor in Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. His main research interest includes geophysics observation technology and instruments.

滕云田(通信作者),1988年于北京理工大学获得学士学位,1991年和2000年于中国地震局地球物理研究所分别获得硕士学位和博士学位,现为中国地震局地球物理研究所研究员、博士生导师,主要研究方向为地球物理观测技术及仪器。