

# 三分量磁通门磁变仪探头正交误差对定向的影响

朱兆才

(大连地震台, 辽宁 大连 116039)

**摘要:** 本文分析了磁通门磁变仪探头三分量正交度误差对定向的影响并提出了减小其影响的措施。

**关键词:** 磁通门磁变仪; 探头线圈; 正交误差; 定向

**中图分类号:** P318.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-2865 (2004) 02-0070-06

## 0 关于定向要求

磁通门磁变仪为数字化、高采样率(一般 1s)、高分辨率(一般 0.1nT)、精确定时的电子仪器。磁通门磁变仪传感器是由高导磁系数、易饱和的磁芯和围绕磁芯的激励线圈及感应线圈组成, 有很强的方向性, 只接受传感器感应线圈轴向的磁场信息。磁通门磁变仪定向就是使磁通门传感器线圈轴方向与被测磁场方向一致<sup>[1]</sup>。探头定向一般一种是 X、Y、Z 定向, 其中 X 指向地理北, Y 指向地理东, Z 指向地心, 用于记录地磁场 X、Y、Z 三个分量的变化。另一种是 H、D、Z 定向, H 水平指向磁北, D 为磁北与地理北的夹角, Z 指向地心, 记录地磁场 H、D、Z 三个分量的变化。因此磁通门传感器三个分量线圈轴两两正交, 互不影响地固定在一个探头框架上。

磁通门磁变仪要想获得高准确度的记录资料, 必须严格定向。国外比较重视统计计算探头定向差角并对磁通门磁变仪原始记录进行改正计算, 但研究表明探头定向差角大时校正计算的误差也大<sup>[2]</sup>, 做好定向是治本的方法。

对于各分量仪, 如果定义相关地磁干扰分量方向与线圈轴夹角的余角, 相关地磁分量在分量线圈轴上的投影即为干扰量。设磁通门三个探头线圈分别与定向方向 X、Y、Z 间有微小差角, 省略电子放大部分, 忽略温度影响, 据此在小角度的情况下可导出下述简易原理式:

$$T_X = X_0 + S_X n_X = X + \tan Y + \tan X Z \quad (1)$$

$$T_Y = Y_0 + S_Y n_Y = Y + \tan X + \tan Y Z \quad (2)$$

$$T_Z = Z_0 + S_Z n_Z = Z + \tan X X + \tan Y Y \quad (3)$$

其中  $X_0$ 、 $Y_0$ 、 $Z_0$  为各分量的补偿磁场,  $S_X$ 、 $S_Y$ 、 $S_Z$  为相应的标度值,  $n_X$ 、 $n_Y$ 、 $n_Z$  为传感器感应输出电压。  $T_X$ 、 $T_Y$ 、 $T_Z$  为计算机记录的各分量准确 nT 值。需要向计算机输入适宜的补偿磁场值抵消被测场的主要部分以提高测量灵敏度, 输入相应分量正确的标度值以便准确定向、在计算机屏幕上读出地磁场相应分量准确的 nT 值。如果三分量线圈轴分别定向在 H、D、Z 方向, 定义

收稿日期: 2003-08

作者简介: 朱兆才 (1946.09), 男, 山东沂水人. 1986年毕业于辽宁师范大学数学专业, 高级工程师, 现从事地磁观测与研究工  
作。

微小夹角  $\alpha$  为  $X$  线圈轴与地磁东方向夹角的余角、 $\beta$  为  $Y$  线圈轴与地磁北方向夹角的余角、 $\gamma$  为  $X$  线圈轴与  $Z$  方向夹角的余角（ $X$  线圈轴与平面夹角）、 $\delta$  为  $Y$  线圈轴与  $Z$  方向夹角的余角（ $Y$  线圈轴与水平面夹角）、 $\theta$  为  $Z$  线圈轴与地磁北方向夹角的余角、 $\phi$  为  $Z$  线圈轴与地磁东方向夹角的余角。上式分别对各影响分量偏微分可得：

$$T_X = H + \tan D + \tan \alpha Z \tag{4}$$

$$T_Y = D + \tan H + \tan \beta Z \tag{5}$$

$$T_Z = Z + \tan \gamma H + \tan \delta Y \tag{6}$$

使日变化  $H$ 、 $D$ 、 $Z$  为  $100\text{nT}$  时，各所在影响项对相应记录的影响小于  $0.1\text{nT}$ ，要求：

- $X$  探头线圈定向： $\alpha < 3.4$ ； $\gamma < 3.4$ ；
- $Y$  探头线圈定向： $\beta < 3.4$ ； $\delta < 3.4$ ；
- $Z$  探头线圈定向： $\theta < 3.4$ ； $\phi < 3.4$ ；

即各定向差角绝对值均小于  $3.4$ （定向标准  $1^{[3]}$ ）。各分量定向操作包括三分量探头正交度以达到此要求为最佳。令各地磁要素变化  $300\text{nT}$  时对相应分量记录的影响小于  $1\text{nT}$ ，则要求各定向差角定向差都小于  $11$ （定向标准  $2^{[4]}$ ）。

## 1 关于探头三分量线圈轴正交度误差对定向的影响

磁通门磁变仪有六个定向参数，较经典磁变仪多。磁通门磁变仪三分量线圈固定在一个使三分量线圈轴正交的探头框架上（图 1 为 GM3 仪探头，各线圈所在平面两两平行或垂直），但工艺上难以做到三分量线圈轴完全正交。如果出厂时磁通门磁变仪探头三分量正交度准至  $30^{[3]}$ （相当于各地磁要素变化  $100\text{nT}$  时对相应分量记录的影响小于  $1\text{nT}$  的定向要求<sup>[4]</sup>）且不能改正，则影响部分定向参数定向精度不好。

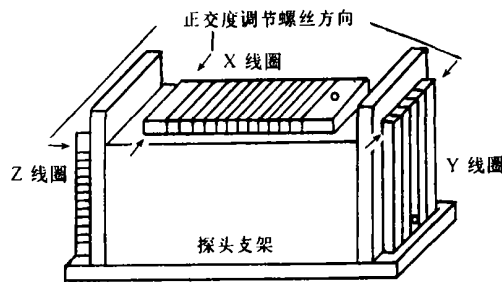


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Sketch of the sensor structure

### 1.1 在探头三分量线圈轴正交度存在误差情况下，六个定向参数中的 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\beta$ 应优先严格定向

从 *SMALL*、*GM3* 等磁通门磁变仪的探头结构和定向操作方法看，探头三分量正交度误差导致部分定向参数达不到 3 要求。在探头三分量线圈轴正交度存在一定误差的情况下，六个定向参数中最多只能保证其中三个定向参数的高精度定向，所以只能对六个定向参数有所取舍。在地磁日常记录中，地磁各要素中  $H$  分量的变化幅度最大（达  $1\sim 3\%$ ，这也是磁暴分析取  $H$  分量为主的原因），因而  $H$  变化对其他两分量记录的干扰也最显著。令  $H$ （ $X$ ）变化  $300\text{nT}$ 、 $D$ （ $Y$ ）变化  $200\text{nT}$ 、 $Z$  变化  $100\text{nT}$  时，对相应分量记录的影响小于  $1\text{nT}$ ，要求定向：

- $X$ （ $H$ ）探头线圈定向： $\alpha < 17$ ； $\gamma < 34$ ；
- $Y$ （ $D$ ）探头线圈定向： $\beta < 11$ ； $\delta < 34$ ；
- $Z$  探头线圈定向： $\theta < 11$ ； $\phi < 17$ ；

以上结果可供实际定向参考。根据日常工作需求，六个定向参数中与  $H$  相关的定向即  $\alpha_x$  应优先严格定向。但是，如果误以为在定向操作中  $\alpha_y$  定向可以放松则可能造成严重后果。以  $Y$  线圈定向为例说明如下。如果探头置于已调水平且可水平转动的有度盘的旋转底座上，给  $Y$  探头线圈准确定向过程如下：

转动底盘使计算机上  $Y$  读数为 0。在磁东西方向磁偏角影响为零，由 (2) 式可得：

$$T_1 = \tan H + \tan \alpha_y Z = 0 \tag{7}$$

再水平转动底盘  $180^\circ$ ，在此位置可得：

$$T_2 = \tan H + \tan \alpha_y Z = N_2 \tag{8}$$

$$\text{式 (7) + (8) 可得: } \tan \alpha_y Z = N_2/2 \tag{9}$$

$$\text{式 (7) - (8) 可得: } \tan H = - N_2/2 \tag{10}$$

回到  $Y$  读数为 0 的位置，微动底盘使  $Y$  读数为  $N_2/2$ 。改动的角度主要因  $\alpha_y$  产生，为  $\tan^{-1}(-\tan \alpha_y Z / H)$ ，此时  $Y$  线圈轴定向在磁东西方向 ( $0^\circ$ )。在此位置再调整  $Y$  线圈倾角使计算机的  $Y$  读数为 0，则定向  $\alpha_y = 0$ 。此方法以下称  $\alpha_y$  定向方法，也是磁通门经纬仪测  $D$  原理，具有定向精确的优点。当  $\alpha_y$  为零时，水平转动探头使计算机  $Y$  读数为 0 可以准确使  $\alpha_y = 0$ ，这是  $Y$  线圈的简易定向方法。

注意到  $\alpha_y$  不为零时，使计算机  $Y$  读数为 0 不能保证  $\alpha_y = 0$ 。例如若  $Z$  线圈与  $Y$  线圈正交差角为  $30^\circ$ ，如果  $Z$  线圈定向无误差、由于探头正交度误差  $\alpha_z$  为  $30^\circ$ ，此时进行  $\alpha_y$  简易定向且定向操作准到  $\pm 3'$ ，则定向  $\alpha_y = 40' \pm 3'$ 。在  $\alpha_y$  简易定向中要求  $\alpha_y$  定向精度高于  $\alpha_z$ ，在  $\alpha_x$  定向方法中  $\alpha_y$  与  $\alpha_x$  定向精度也是等量级的，所以必须重视  $\alpha_y$  定向。

经典光记录  $D(H)$  仪采用悬垂吊丝使  $\alpha_y = 0$ ， $\alpha_x$  定向精度可达到很高精度。磁通门磁变仪如果不重视做好定向工作，其记录的内在质量可能不如定向好的经典光记录磁变仪<sup>[5,6]</sup>。

### 1.2 不同顺序定向操作中，正交度误差对定向的影响

探头三分量线圈轴正交度有误差且不能改变时，不同定向顺序、不同操作方法中正交度误差对定向的影响不同。例如若各线圈轴正交差角均为  $30^\circ$ 、定向操作恰准到  $\pm 3'$  时，按照 GM3 仪说明书方法先使水准器调平（水准泡以  $Z$  线圈  $\alpha_x = 0$ 、 $\alpha_y = 0$  为准），然后使计算机  $Y$  读数为 0 进行  $\alpha_y$  简易定向。考虑到正交度误差存在，取  $H/Z = 3/4$  时的最大定向误差为：

$$X(H) \text{ 探头线圈定向: } \alpha_x = 73'; \quad \alpha_y = 33';$$

$$Y(D) \text{ 探头线圈定向: } \alpha_x = 43'; \quad \alpha_y = 33';$$

$$Z \text{ 探头线圈定向: } \alpha_x = 3'; \quad \alpha_y = 3'。$$

由于  $\alpha_x$  定向只准至  $43'$  和  $Y$ 、 $X$  线圈正交度误差  $30^\circ$ ，进一步影响  $\alpha_x$  定向误差最大可达  $73'$ 。如果探头上没有水准器（SMALL 仪等）、或有水准器但未校准、或由于  $Z$  定向控制螺丝在磁南北方向定位不准的干扰，均可能使  $Z$  定向不准<sup>[7]</sup>。先进行的  $Z$  线圈  $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$  定向不准误差，干扰此后的其它要素定向误差比以上结果还大。

如果先进行  $X$  线圈  $\alpha_x$  定向，然后进行  $Y$  线圈  $\alpha_y$  定向，则定向结果为：

$$X(H) \text{ 探头线圈定向: } \alpha_x = 30' \pm 3'; \quad \alpha_y = 3';$$

$$Y(D) \text{ 探头线圈定向: } \alpha_x = 3'; \quad \alpha_y = 3';$$

$$Z \text{ 探头线圈定向: } \alpha_x = 30' \pm 3'; \quad \alpha_y = 30' \pm 3'。$$

由于  $\alpha_x$  定向方法具有定向精确的优点，以  $H$ 、 $D$ 、 $Z$  仪为序进行定向可以减小探头正交度误差的影响，确保部分定向参数的定向精度。

### 1.3 减小探头三分量正交度误差对定向影响的措施

#### 1.3.1 在探头三分量正交度不能校正情况下，应注意不同定向顺序中正交度误差的影响



如果有条件, 最佳严格定向操作应将探头置于有读数刻度的水平旋转底座上, 先进行 X 线圈 — $x$  定向, 再进行 Y 线圈 — $y$  定向, 最后进行 Z 线圈 — $z$  定向。GM3 仪探头置于旋转底座上用探头底角调解  $\alpha$ , 先进行 — $y$  准确定向, 同时可使 Z 仪 — $z$  定向螺丝定位准确、利于  $x$  严格定向。当三分量线圈轴正交度误差  $\leq 30'$  且不能改变时的期望定向为:

X (H) 探头线圈定向:  $\alpha = 30' \pm 3'$ ;  $\beta = 30' \pm 3'$ ;

Y (D) 探头线圈定向:  $\alpha = 3'$ ;  $\beta = 30' \pm 3'$ ;

Z 探头线圈定向:  $\alpha = 3'$ ;  $\beta = 3'$ 。

这是正交度不能校正情况下优先  $y$ 、 $x$  严格定向的程序。

### 1.3.2 在探头上设置互相垂直的长水准泡控制定向

在探头三分量线圈已固定不能改变的条件下, 可以像 GM3 磁通门磁变仪在探头上设置互相垂直的水准泡控制定向。根据实际工作的需求, 六个定向参数中与 H 分量相关的定向即  $\alpha$ 、 $\beta$  应优先严格定向。故建议仪器出厂时, 水准泡一个以 Y 线圈 — $y=0$  为准, 一个以 Z 线圈 — $z=0$  为准, 以方便台站用 简易定向方法准确定向。水准泡校准工作可以在仪器出厂前或在台站使用前, 使用旋转平台先进行 Y 线圈 — $y$  精确定向, 再进行 Z 线圈 — $z$  准确定向, 然后完成水准泡校准工作。用此方法校准水准泡, 可为以后在使用中用水准泡和 简易定向方法方便地完成磁通门磁变仪准确定向创造条件。

### 1.3.3 建议在探头内设置微调三分量线圈正交度的控制螺丝

如果探头内三分量线圈各设置一对微调正交度的控制螺丝并可打开调试 (图 1), 将探头置于已调水平且可水平转动的有度盘的旋转底座上, 调好旋转底座水平, 通过以下步骤可以测定探头三分量正交度情况并改正正交度误差。

#### (1) X、Y 探头线圈正交度的测量与改正

先利用探头底座螺丝进行 Y 线圈的 — $y$  定向, 然后转动度盘  $90^\circ$  记录 Y 线圈的度盘读数  $B_y$ 。再进行 X 线圈轴在磁东西位置的 — $x$  定向, 得到此时 Y 线圈位置的度盘读数  $B_x$ , 计算  $B_y - B_x$  得到 X、Y 探头线圈正交度的误差角。

转动度盘使 Y 线圈回到  $B_y$ , 调探头内设置的 X 线圈水平位置的定向螺丝使 X 分量的计算机读数回到零进行改正, 可使 X 线圈与 Y 线圈正交。

#### (2) Z、Y 探头线圈正交度的测量与改正

使 Z 探头线圈一对定向螺丝在 H 方向上, 另一对定向螺丝与之正交。先利用探头底座螺丝进行 Y 线圈的 — $y$  定向, 记下使计算机的 Y 读数为 0 的 Y 线圈的度盘定向位置。再转动度盘  $90^\circ$ , 利用探头底座螺丝进行 Z 线圈一对定向螺丝在 H 方向上的定向, 使 Z 线圈 — $z=0$ 。转动度盘  $90^\circ$  回到 Y 线圈定向位置, 读取计算机的 Y 读数  $N_y$ 。由于  $\beta = 0$  可得  $\alpha = \tan^{-1} (N_y / Z)$ , 这也是 Z、Y 探头线圈正交度的误差角。

调探头内设置的控制 Y 线圈平面垂直度的定向螺丝, 改变 Y 线圈平面的垂直度使计算机的 Y 读数由  $N_y$  变为零, 可使 Y 线圈与 Z 线圈正交。

#### (3) Z、X 探头线圈正交度的测量与改正

把 X 探头线圈置于 Y 线圈的定向位置, 看作 Y 线圈进行前述操作, 可得 Z、X 探头线圈正交度的误差角。

先进行 X 线圈在 Y 线圈定向位置的 — $x$  定向, 再转动度盘  $90^\circ$  调探头内设置的控制 Z 线圈平面垂直度  $\alpha$  的定向螺丝, 进行 Z 线圈在 H 方向上的定向使  $\beta = 0$ , 可使 X 线圈与 Z 线圈正交。

#### (4) 影响探头线圈正交度测量与改正的因素

将标准 1 要求代入 (1) ~ (3) 式相应影响项, 当  $H = 30000 \text{ nT}$ 、 $Z = 40000 \text{ nT}$  时, 得到定向操作时各

分量定向相应的计算机 T 读数误差要求为:

X 线圈定向的 T 读数误差:  $< 30n T$ ;  $x < 40n T$ ;

Y 线圈定向的 T 读数误差:  $< 30n T$ ;  $y < 40n T$ ;

Z 线圈定向的 T 读数误差:  $x < 30n T$ ;  $y < 30n T$ .

磁通门磁变仪探头置于旋转底座上时, 底座水平度直接影响定向必须调好。底座水平转 90 或 180 定位不准影响测定。例如底盘水平转 180 时定位误差为 0.1 时 Z 读数误差可达 52n T。最好采用光学方法严格控制旋转底座的定位。

Z 线圈定向操作中不能将定向控制螺丝定位在磁南北方向的影响也需注意。设一对 Z 定向螺丝在 X (Y) 方向上、计算机上 Z 读数为 N, 由 (3) 式在初始位置:

$$T_1 = Z + \tan_x X + \tan_y Y = N_1 \quad (11)$$

水平转动底盘 180°, 在此位置得到 Z 分量计算机读数:

$$T_2 = Z - \tan_x X - \tan_y Y = N_2 \quad (12)$$

式 (11) + (12), 可得:

$$Z = (N_1 + N_2) / 2 \quad (13)$$

$(N_1 + N_2) / 2$  是应测的地磁场 Z 值。

式 (11) - (12) 可得:

$$\tan_x X + \tan_y Y = (N_1 - N_2) / 2 \quad (14)$$

通过调整某一对定向螺丝改变  $x$  或  $y$ , 使 Z 分量在计算机上的读数  $T_2 = (N_1 + N_2) / 2$ , 可以使  $\tan_x X + \tan_y Y = 0$ 。由于涉及两个量, 分别调整只能调整至两项干扰量互相抵消, 不能调整至各干扰量均为零。所以 Z 定向螺丝定位不准对  $x$  和  $y$  定向影响很大。Z 定向螺丝要严格定位在 H 方向上, 两对互相垂直的定向螺丝分别在 H 方向上反复定向, 并转动底盘到任意角度进行检查。存在环境铁磁性干扰时, Z 定向螺丝应在地磁场与弱铁磁环境场水平合磁场方向上<sup>[5]</sup>。

由前 1.3.3 所述, 微调控制六个定向参数, 探头框架上各线圈无需各设置两对微调控制螺丝, 只要各设置一对微调控制螺丝即可。图 1 探头框架中 Z 线圈正交度误差不易微调控制, 探头框架各线圈及微调设置采用图 2 方式较好。

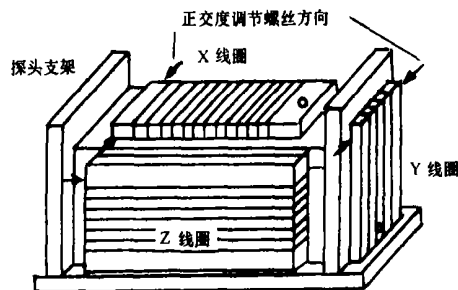


图 2 传感器示意图

Fig. 2 Sketch of sensor structure

## 2 几点思考和建议

(1) 磁通门磁变仪有六个定向参数, 各定向差角最好均小于 3°, 即各分量定向包括探头三分量正交度误差以小于 3° 为最佳。对于三分量线圈固定在一起的磁通门磁变仪, 探头三分量正交度误差影响部分定向参数达不到要求定向。从 SMALL 等磁通门磁变仪的探头结构和定向操作方法

看, 探头结构及相应定向可进一步改进。

(2) 探头三分量正交度有误差且不能改变时, 六个定向参数中只能使三个定向参数满足定向标准 1。由于日常记录中  $H$  变化对记录的影响 (特别是磁暴时) 是主要的, 应确保与  $H$  分量相关的定向即  $Y$ 、 $X$  优先严格定向。为了准确定向,  $Z$  也应优先严格定向。

(3) 应注意不同定向顺序中探头三分量正交度误差的影响, 最佳严格定向操作是将探头置于有读数刻度的水平旋转底座上, 先进行  $X$  线圈  $—X$  定向, 再进行  $Y$  线圈  $—Y$  定向, 最后进行  $Z$  线圈  $—Z$  定向。这是正交度不能校正情况下优先  $Y$ 、 $X$  严格定向的程序。如果探头内设置有本文建议的各线圈定向微调螺丝, 此程序定向并校正可望进而使探头三分量正交度和各定向参数定向操作精度都达到定向标准 1。

(4) 磁通门磁变仪探头置于有读数刻度的水平旋转底座上定向, 实际使用有一定条件限制且不方便。在探头上设置互相垂直的长水准泡控制定向 (如 GM3 磁通门磁变仪) 是方便定向的实用好方法, 但水准泡应该一个以  $Y$  线圈  $Y=0$  为准, 一个以  $Z$  线圈  $Z=0$  为准, 如此可以方便台站用水准泡和 简易定向方法准确定向。

#### 参考文献:

- [1] Jerzy Jankowski 等著, 周锦屏等译. 地磁测量与地磁台站工作指南 [M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [2] 朱兆才. 磁通门磁变仪状态函数的测定与记录的校正计算 [J]. 东北地震研究, 2003.
- [3] 国家地震局编制. 地震及前兆数字观测技术规范 电磁观测 [M]. 北京: 地震出版社, 2001.
- [4] 国家地震局编制. 地磁台站观测规范 [M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- [5] 朱兆才. 磁通门磁变仪与光记录磁变仪记录的比较 [J]. 东北地震研究, 2002.
- [6] 朱兆才. 磁通门磁变仪与经典磁变仪状态函数的比较 [J]. 东北地震研究, 2001.
- [7] 朱兆才. 环境对磁通门磁变仪定向影响的分析 [J]. 东北地震研究, 2002.

## EFFECTS ON THE RIGHT - ANGLED ERROR OF THE THREE - COMPONENT FLUX GATE MAGNETOMETER EXPLORING HEAD TO THE SENSE OF ORIENTATION

ZHU Zhao-cai

(Dalian Seismic Station, Liaoning Dalia 116039)

**Abstract :** Effects on the right - angled error of the three - component Flux Gate Magnetometer exploring head to direction were analysed and some methods to reduce the effect were put foward in this paper.

**Key words:** Flux Gate Magnetometer; Exploring head coil; Right - angled error; Sense of orientation