



## 分量核旋仪补偿电流选定方法的研究\*

夏忠<sup>1</sup>, 冯志生<sup>2</sup>, 稽才建<sup>3</sup>, 陈兴东<sup>2</sup>

(1. 江苏省新沂地震台, 江苏 新沂 221400 2. 江苏省地震局,  
江苏 南京 210014 3. 江苏省盐城地震台, 江苏 盐城 224005)

**摘要** 通过对核旋仪分量补偿测量原理与磁偏角补偿测量原理的推导, 得出对分量补偿电流与偏置补偿电流进行选定的数学方法, 并将这种选定方法应用到新一代数字化分量核旋仪的设计中。实际应用表明该方法选定精确、方便适用。

**关键词** 分量核旋仪; 补偿电流; 选定方法

中图分类号: P315.62; P318.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2004)02-0186-04

### 0 引言

目前在我国地震地磁台站进行观测的各种类型的分量核旋仪, 以及在“九五”期间新研制的 FHD-1 型分量核旋仪, 对磁场分量与磁偏角的测量都是采用电流补偿的方法。由于补偿电流电路和补偿线圈电流常数的稳定性以及其它一些因素的影响, 会使补偿电流产生一些漂移, 对磁场分量与磁偏角的观测值产生影响, 按照地磁观测规范需要定期对仪器设定的补偿电流进行检查、选定或调整。

常规对测量磁偏角需要的分量补偿电流与偏置补偿电流的日常选定是依照分量核旋仪安装调试的方法和步骤重新进行选取。由于偏置磁场的偏置电流是重新选取的, 这时作为参照的磁北方向和水平分量的大小已经发生了变化, 测出的磁偏角的相对变化量  $\theta$  与选定前相比也发生了变化, 其变化曲线在偏置电流重新选取前后将产生一个比较明显的变化台阶。要消除这个变化台阶, 必须对仪器的磁偏角加入一个  $\Delta\theta$  的修正, 这个  $\Delta\theta$  就是霍姆赫兹补偿线圈调整前后工作方位角的差。这种选定方法不但对操作人员有一定技术的要求, 而且既费时又费力。

为了解决上述问题, 课题组研究了一套无需转动分量线圈, 只要采取一定的数学方法和步骤便可实现对分量补偿电流与偏置补偿电流进行选定的方法。这种方法对操作人员无特殊的技术要求, 简单方便。并将这种选定方法应用到新一代数字化分量核旋仪的设计中, 使补偿电流的控制、设置与选定实现了数字化。

### 1 分量补偿电流的选定方法

#### 1.1 分量补偿测量原理

在分量核旋仪测量垂直分量  $Z$  时, 需要在霍姆赫兹补偿线圈中加补偿电流, 使之产生与水平分量  $H$  相抵消的磁场  $H_1$ ; 在测量水平分量  $H$  时, 需要在补偿线圈中产生补偿磁场  $Z_1$ , 以抵消垂直分量  $Z$ 。以测量水平分量  $H$  为例:

$$H_p = \sqrt{H^2 + (Z_1 - Z)^2} \quad (1)$$

$H_p$  为分量核旋仪上水平分量的读数,  $Z_1$  是霍姆赫兹补偿线圈中产生的补偿磁场。只有在  $Z_1 = Z$  时, 才有  $H_p = H$ , 即所观测到的值才是需要观测的值。

对式(1)作多项式展开, 且取前两项可得

$$H_p = H + \frac{(Z_1 - Z)^2}{2H} \quad (2)$$

式中  $Z_1 = \eta \cdot I$ ,  $\eta$  为霍姆赫兹线圈常数,  $I$  为线圈中通过的补偿电流。则式(2)转化为

$$H_p = H + \frac{(\eta \cdot I - Z)^2}{2H} \quad (3)$$

设补偿电流选定的某一时刻, 线圈常数为  $\eta_0$ , 垂直分量为  $Z_0$ , 为求解方便, 令  $\eta_0^2 / (2H) = a$ ,  $Z_0 / \eta_0 = I_0$ , 则式(3)转变

为

$$H_p = H + a(I - I_0)^2 \tag{4}$$

从式(4)可以看出  $I = I_0$  时 抛物线有极小值  $H_p = H$  此时的电流值  $I_0$  就是对水平分量进行测量所需要的补偿电流值。

### 1.2 分量补偿电流的选定方法

式(4)中的  $H, a, I_0$  为待定系数 只要测出三组  $(I, H_p)$  便可以确定所需要求的  $I_0$  值。即

$$\begin{cases} H_1 = H + a(I_1 - I_0)^2 \\ H_2 = H + a(I_2 - I_0)^2 \\ H_3 = H + a(I_3 - I_0)^2 \end{cases} \tag{5}$$

得

$$I_0 = \frac{(H_1 - H_2)(I_1^2 - I_3^2) - (H_1 - H_3)(I_1^2 - I_2^2)}{2[(H_1 - H_2)(I_1 - I_3) - (H_1 - H_3)(I_1 - I_2)]} \tag{6}$$

但是选择抛物线上的三点求得的  $I_0$  值 有时会产生一些误差。为了避免这种误差的产生 可以在抛物线上再选择五点求解  $I_0$  值。首先给定一初选电流  $I_1$  测出该电流下三个水平分量 取其中间值作为  $H_1$  然后在  $I_1$  的基础上分别取  $I_2 = I_1 + \Delta I, I_3 = I_1 - \Delta I, I_4 = I_1 + 2\Delta I, I_5 = I_1 - 2\Delta I$  并测得四组三水平分量数据 分别取其中间值作为  $H_2, H_3, H_4, H_5$  以上 5 点分别排列组合 用式 (6) 分别求得  $I_{01}, I_{02}, I_{03}, \dots, I_{08}, I_{09}$  共 9 个电流值。为避免某些因素对观测值的影响 去除两个最大值与两个最小值 以剩下的 5 个电流值的平均值作为最终补偿电流值  $I_0$ 。

由于抛物线底部较为平坦 为避免测量误差带来的计算误差  $\Delta I$  取值应在 3 ~ 6 mA 为宜。在 FHD-2 型分量核旋仪中  $\Delta I$  取 4 mA。在日常观测进行补偿电流选定 给定的初选电流  $I_1$  就是当前正在观测时的补偿电流 在仪器初次安装调试时 可以用下式进行计算选取：

$$I_1 = \frac{ZR}{89.918N} \tag{7}$$

式中  $I_1$  为初选补偿电流强度  $N$  为补偿线圈的匝数  $R$  为补偿线圈的半径 单位取 cm  $Z$  为测点地磁场垂直分量值或其估计值 单位取 nT。

### 1.3 在分量核旋仪中的应用

在新设计 FHD-2 型分量核旋仪中 输出补偿电流实现了数字化控制 应用上述方法对分量补偿电流进行选定 再转换成控制代码来控制电流的输出 使该仪器实现了补偿电流的数字化设置、选定与控制。仪器的补偿电流自动选定功能设置成三种工作方式 (1)手动选定方式 (2)自动选定方式 (3)远程选定方式。手动选定方式适合仪器安装调试时或有人值守地磁台站使用 当按下某个分量补偿电流选定功能键 仪器会自动根据五点求解选取补偿电流  $I_0$  ;自动选定方式可根据用户设定的日期和时间 按五点求解法自动选取补偿电流  $I_0$  远程选定方式可通过远程通信方式指令仪器按照五点求解法进行一次分量补偿电流  $I_0$  的自动选取。

以新沂台某次水平分量测定为例。该台仪器的水平线圈匝数  $N = 200, R = 60$  cm  $Z$  在 39 660 nT 左右。据式(7)可粗略地计算出补偿垂直磁场需要的电流为 133.30 mA 以此电流作为电流初值进行自动选定 75 秒钟后得出选定结果为 133.56 mA(表 1);用手动方法验证选定结果正确(表 2)。

表 1 五点法补偿电流自动选定的测值与计算结果

$I_1$	测数 1	测数 2	测数 3	中间值	$I_0$
/mA	/nT	/nT	/nT	/nT	/mA
133.30	31 992.9	31 992.6	31 992.5	31 992.6	
137.30	32 011.5	32 011.9	32 011.8	32 011.8	
129.30	32 017.9	32 017.5	32 017.5	32 017.5	133.56
141.30	32 074.7	32 074.2	32 074.9	32 074.7	
125.30	32 086.0	32 086.1	32 086.5	32 086.1	

表 2 手动方法验证结果

$I_1$	测数 1	测数 2	测数 3
/mA	/nT	/nT	/nT
127.56	32 041.8	32 041.6	32 041.9
130.56	32 004.9	32 004.7	32 004.9
133.56	31 992.3	31 992.6	31 992.8
136.56	32 004.6	32 005.1	32 004.8
139.56	32 041.6	32 042.0	32042.1

测量垂直分量时补偿电流自动选取的工作原理和方法与测量水平分量时相同。

## 2 偏置补偿电流的选定方法

### 2.1 相对磁偏角的测量原理

在分量核旋仪测量磁偏角相对变化量  $\theta$  时 用磁轴与  $Z$  平行的线圈抵消掉  $Z$  之后 再用另一线圈在水平面内分别产生东西方向上的两个大小相等方向相反的偏置磁场  $C_+$  与  $C_-$  同时测定  $C_+, C_-$  与  $H$  的合成磁场  $R_+$  和  $R_-$  按照一定的几何关系便可计算出磁偏角的相对变化量  $\theta$ 。如图 1(a) 所示 当  $C_+, C_-$  垂直于  $H$  时 则  $|R_+| = |R_-|$  此时  $H$  在磁子午线方

向上,令此时的 $H$ 为 $H_0$ 。当 $H$ 与 $H_0$ 之间存在夹角 $\theta$ 时(图1(b)),此时

$$R_+^2 = H^2 + C_+^2 + 2HC_+ \sin \theta \quad (8)$$

$$R_-^2 = H^2 + C_-^2 - 2HC_- \sin \theta \quad (9)$$

式(8)、(9)相减,由于 $C_+ = C_- = C$ ,得

$$R_+^2 - R_-^2 = 4HC \sin \theta \quad (10)$$

$$\theta = \arcsin \left( \frac{R_+^2 - R_-^2}{4HC} \right) \quad (11)$$

式(11)中 $R_+$ 、 $R_-$ 、 $H$ 可以通过仪器直接测量得到;偏置磁场 $C$ 是一个设定的常数,在FHD分量核旋仪中取值等于 $H_0$ 。由于 $R$ 是 $H$ 与 $C_+$ 和 $C_-$ 的合成,因此磁偏角的测量实际只与 $H$ 和 $C$ 有关。

由于补偿电路的稳定性和补偿线圈电流常数的稳定性会随着时间产生漂移,使 $H$ 和 $C$ 的观测值精度受到影响。根据观测规范,应定期对补偿电流进行调整或选定。

### 2.2 偏置电流的选定方法

根据磁偏角的测量原理,由式(8)和式(9)相加得 $R_+^2 + R_-^2 = 2(H^2 + C^2)$ 。若实际的偏置磁场为 $C_p$ ,则有

$$C_p = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(R_+^2 + R_-^2) - 2H^2} \quad (12)$$

当 $C_p$ 值与初始选定的偏置磁场 $C_0$ 值即 $H_0$ 的值不相等时,说明产生了漂移。

由于 $C_p = \eta \cdot I$ ( $I$ 为偏置磁场的偏置电流, $\eta$ 为线圈常数),即 $\eta = C_p/I_0$ 。由于当前的线圈常数 $\eta$ 是一定的,再根据初始设定的 $C_0$ 值(即 $H_0$ )可得到需要得到的偏置补偿电流 $I_0$ :

$$I_0 = \frac{C_0}{\eta} \quad (13)$$

实际对偏置补偿电流进行选定时,采用连续测量三组 $R_+$ 、 $R_-$ 、 $H$ ,根据式(12)分别计算出三组 $C_p$ (即 $C_{p1}$ 、 $C_{p2}$ 、 $C_{p3}$ );取其中的中间值计算出线圈常数 $\eta$ 。

### 2.3 在分量核旋仪中的应用

在FHD-2型分量核旋仪的设计中,应用了上述对偏置磁场的偏置补偿电流进行选定的方法,用程序控制对偏置补偿电流的选定和修正,并将这种自动选定功能设置成四种工作方式,即(1)手动选定方式(2)自动选定方式(3)远程选定方式;(4)自动跟踪方式。前三种方式与分量补偿电流的选定方式相同;增加的自动跟踪功能可根据设定自动将每次测量到的 $R_+$ 、 $R_-$ 、 $H$ 计算出实际的偏置磁场 $C_p$ ,再计算出 $I_0$ ,并将该电流值存入偏置电流设置单元作为下一次磁偏角测量的偏置补偿电流,从而达到提高磁偏角的测量与计算精度的目的。

以新沂台为例,该台仪器分量线圈偏置补偿电流原先选定为110.79 mA,偏置磁场设定为31 980.5 nT。根据上述方法重新选定的补偿电流为110.70 mA(表3),验证结果(表4)表明,设定的偏置磁场值与计算值相符,选定结果正确。

表3 偏置补偿电流选定数据与结果

$I_{(原)}$	$C_{(设)}$	$R_+$	$R_-$	$H$	$C_p$	$I_{(选定)}$
/mA	/nT	/nT	/nT	/nT	/nT	/mA
110.79	31 980.5	45 255.1	45 254.6	31 992.5	32 007.5	110.70
		45 254.6	45 255.0	31 993.4	32 006.5	
		45 254.6	45 254.2	31 993.6	32 005.7	

表4 选定后验证结果

$I_{(原)}$	$C_{(设)}$	$R_+$	$R_-$	$H$	$C_p$
/mA	/nT	/nT	/nT	/nT	/nT
110.70	31 980.5	45 237.1	45 236.7	31 993.5	31 981.1
		45 236.6	45 236.0	31 992.9	31 980.9
		45 236.4	45 237.2	31 993.7	31 980.8

## 3 结束语

我国地磁核旋观测网作为中国数字地震前兆观测网络的一部分,正逐步向数字化、网络化方向发展。分量核旋仪补偿电流的选定技术是分量核旋观测技术的重要组成部分,进行补偿电流选定方法的研究,并将其应用到数字化分量核旋仪中,对地磁绝对观测实现数字化、网络观测有着比较重要的意义。

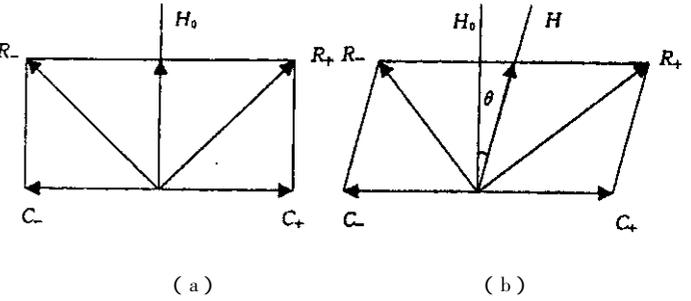


图1 分量核旋仪测D原理图

Fig.1 Diagram of measuring declination for vector proton magnetometer.

## [ 参考文献 ]

- [ 1 ] 国家地震局. 地震台站观测规范( 试行 ) ( S ). 北京 : 地震出版社 , 1978.
- [ 2 ] 高玉芬, 钱家栋. 地震及前兆数字观测技术规范( 地磁观测 ) ( S ). 北京 : 地震出版社 , 2001.
- [ 3 ] 国家地震局科技监测司. 地震地磁观测技术( M ). 北京 : 地震出版社 , 1995.
- [ 4 ] 熊仲华, 刘运生. 地磁观测技术( M ). 北京 : 地震出版社 , 1997.
- [ 5 ] 稽才建, 何祖椿, 马森林, 等. FHD - 1 型质子磁力仪研制报告( M ). 北京 : 地震出版社 , 1999. 1 - 3.
- [ 6 ] 冯志生, 杨冬梅, 夏忠, 等. 分量核旋仪偏置电流对磁偏角测量的影响分析( J ). 地震 , 2002 , 22( 2 ) : 60 - 65.
- [ 7 ] 仇中阳. 调整核旋仪的一种数值方法( J ). 地震地磁观测与研究 , 1993 , 14( 3 ) : 48 - 52.

## A SELECTING METHOD OF COMPENSATE CURRENT FOR VECTOR PROTON PRECESSION MAGNETOMETER

XIA Zhong<sup>1</sup> , FENG Zhi-sheng<sup>2</sup> , JI Cai-jian<sup>3</sup> , CHEN Xing - dong<sup>2</sup>

( 1. Xinyi Seismological Station , Jiangsu Xinyi 221400 , China ; 2. Seismological Bureau of Jiangsu Province , Jiangsu Nanjing 210014 , China ; 3. Yancheng Seismological Station , Jiangsu Yancheng 224005 , China )

**Abstract :** Using the vector compensate measuring theory and the declination compensate measuring theory for vector proton precession magnetometer , a mathematical method for selecting vector compensate current and bias current is worked out . The selecting method have been applied in a new style of vector proton precession magnetometer and shows it is accurate and simple in practice.

**Key words :** Magnetometer ; Compensate current ; Selecting method