

用标量磁力仪测定岩(矿)石标本磁参数的几个问题

梁建^{1,2}, 黄金辉¹, 薛月芬¹, 张川¹

(1. 中国冶金地质总局地球物理勘查院, 河北保定 071051;

2. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

摘要: 磁参数测量是磁法勘探中的一个环节, 对进行异常解释起着至关重要的作用。文章指出了梯度测量方式只是利用磁力仪的“梯度模式”在测量过程中进行日变改正。对高斯第一位置和高斯第二位置给出了明确的定义; 指出高斯第一位置和高斯第二位置磁参数计算公式为何不同。讨论了水平测定方法和倾斜测定法之间的关系。对于定向标本指出了剩磁偏角和剩磁方位角的不同, 并在最后给了最佳的测量方案。

关键词: 标量磁力仪; 磁参数; 梯度; 水平测量; 倾斜测量

中图分类号: P318.63, P631.22 **文献标识码:** A

0 引言

磁法勘探找矿是地球物理探矿的方法之一, 是寻找磁铁矿最主要的手段。岩矿石磁性的差异, 是产生磁异常的地质原因, 是磁法勘探的地球物理基础。因此要对磁异常进行正确的地质评价就必须对岩矿石的磁性参数进行测定, 掌握各种岩石的磁性强弱及其空间分布特征。可见获得研究区内的岩矿石的磁性参数在磁法勘探中是一项十分重要的工作, 它对准确的进行磁异常地质解释具有重大意义^[1]。

标量磁力仪测量地球的总场强度(T), 在磁参数的测量工作中, 用标量磁力仪(如质子磁力仪)测量岩石标本产生的磁场来计算出岩石标本的磁化率(κ)和剩余磁化强度(M_r)。

由于磁法勘查在各行业所定的规范也不尽相同, 对磁参数测定的方法也不相同, 测量过程中遇到的问题主要集中在以下4个方面: ①总场测量方式

和梯度测量方式; ②高斯第一位置和高斯第二位置; ③倾斜测定法和水平测定法; ④定向标本和非定向标本。本文将对以上4个问题进行讨论。

1 总场测量方式和梯度测量方式

磁性参数测量可以根据测量的方式分为总场方式和梯度方式。但很多工作人员迷惑于测量方式的概念, 并不能进行深刻的理解。

(1) 总场测量。采用单探头的总场测量装置则必须要求在附近另设一台测日变 T_0 的同类仪器, 将每次读数 T_l (l 表示测量时标本盒的六个面, 本文中六个面以坐标轴的方向 $\pm x$ 、 $\pm y$ 、 $\pm z$ 来表示) 进行日变改正后才能算出标本产生的磁场 ΔT_l ($\Delta T_l = T_l - T_0$)。

(2) 梯度测量。采用双探头的梯度测量装置, 靠近标本的探头(下探头)测量正常场和标本的叠加磁场, 而远离标本的探头(上探头)通常认为不受标本磁场影响, 测量的是正常场。放置标本时仪器梯度

收稿日期: 2015-09-07; 改回日期: 2015-12-28; 责任编辑: 王传泰

基金项目: 中国地质调查局项目(编号: 1212011140136)、青海省国土厅项目(编号: 11-1-HK1)联合资助。

作者简介: 梁建(1983—), 男, 工程师, 硕士研究生, 从事航空物探综合研究工作。通信地址: 河北省保定市阳光北大街139号, 中国冶金地质总局地球物理勘查院; 邮政编码: 071051; E-mail: liangjian3661@foxmail.com

读数(TH)即为标本所产生的磁场^[1]。

需要说明的是梯度方式测量中,我们所要的是磁力仪在“梯度模式”下输出的梯度读数(即下探头和上探头的差值),并不需要除以两个探头之间的距离求真实的磁场梯度值;只是利用仪器的“梯度模式”,其目的是进行日变改正。在实际工作中多见误将真实梯度值用来计算磁参数,因为探头间距离通常小于 1 m,导致磁参数计算值偏大,实际上是对这一概念理解错误而导致^[2]。

总场测量方式和梯度测量方式实际上是一致的,两种方式都需要两个探头,有很好的 consistency。

2 高斯第一位置和高斯第二位置

《地磁场与磁力勘探》^[1]只是给出了磁秤法测定磁参数的高斯第二位置的计算公式的推导过程;地矿行业磁测标准^[2]中给出了用质子磁力仪测定岩石标本磁参数的高斯第一位置和高斯第二位置时的计算公式。但对高斯第一位置和高斯第二位置没有明确的说明,高斯第一位置和高斯第二位置计算公式为何不同也未做说明。

通常对野外采集的标本使用质子磁力仪测量它的磁化率 κ 和剩余磁化强度 M_r 时,把标本产生的磁场看作是磁偶极子产生的磁场^[1]:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3} \right]$$

式中, $\vec{m}$ 为磁偶极子磁矩, $\vec{r}$ 为距磁偶极子的距离为 r 的向量。按照测量时磁探头与标本之间的位置关系有高斯第一位置和高斯第二位置。由于磁力仪所测量的值为磁场的模量值,在这里规定其与地磁场方向一致时磁场矢量为正。

(1) 高斯第一位置定义

磁探头与标本连线平行于地磁场方向。此时标本对探头产生的磁场:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\vec{m}}{r^3}$$

从图 1 中可以看出,对于给定的 r_1 ,高斯第一位置实际上有两个点,以 r_1 为半径的圆与地磁场方向的交点,通常选择斜上方的点的位置。

(2) 高斯第二位置定义

磁探头与标本连线垂直于地磁场方向。此时标本对探头产生的磁场:

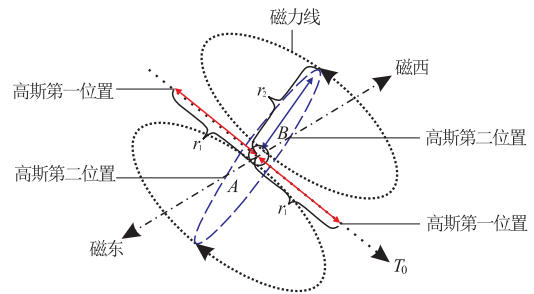


图 1 磁偶极子感应磁场中的高斯第一位置与高斯第二位置

Fig. 1 The first and the second Gauss position in the induced magnetic field of the magnetic dipole

$$\vec{B} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{m}}{r^3}$$

上式中负号表示与地磁场的方向相反。从图 1 中可以看出,对于给定的 r_2 ,这样的点有无数个,以 r_2 为半径的圆与磁力线的交点。但实际上更多时候我们只取和标本等高的正东或正西方向的交点中的一个(A 或 B)。

使用高斯第一位置和高斯第二位置感应磁场表达式,就可以推导出对梯度测量方式的第一位置和第二位置不同的计算公式与规范相同。

(1) 梯度测量方式的第一位置计算公式

设未放置标本前梯度读数为 ΔT_0 ,放置标本后在 x 轴的正反方向两个读数为 ΔT_{+x} 和 ΔT_{-x} ,则有:

$$(\Delta T_{+x} - \Delta T_0) \times 10^{-9} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\vec{m}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2(M_{ix} + M_{rx})V}{r^3}$$

$$(\Delta T_{-x} - \Delta T_0) \times 10^{-9} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\vec{m}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2(M_{ix} - M_{rx})V}{r^3}$$

上面两式中 M_{ix} 和 M_{rx} 分别为标本 x 轴方向上的感应磁化强度和剩余磁化强度。

将上面两式相加后得到:

$$(\Delta T_{+x} + \Delta T_{-x} - 2\Delta T_0) \times 10^{-9} = \frac{\mu_0 M_{rx} V}{\pi r^3}$$

由于 $M_{ix} = \kappa_x H = \kappa_x \cdot \frac{T_0 \times 10^{-9}}{\mu_0}$, 所以 $\kappa_x = \frac{\pi r^3}{T_0 V}$

$$(\Delta T_{+x} + \Delta T_{-x} - 2\Delta T_0) \times 10^{-9} = \frac{\mu_0 M_{rx} V}{\pi r^3}$$

将前面两式相减可以得到:

$$(\Delta T_{+x} - \Delta T_{-x}) \times 10^{-9} = \frac{\mu_0 M_{rx} V}{\pi r^3}$$

由于 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, 可得 $M_{rx} = \frac{5r^3}{2V} (\Delta T_{+x} - \Delta T_{-x}) \times 10^{-3}$ 。

因 $\kappa = \frac{1}{3}(\kappa_x + \kappa_y + \kappa_z)$, $M_r = (M_{rx}^2 + M_{ry}^2 + M_{rz}^2)^{1/2}$

ΔT_{+z} 和 ΔT_{-z} , 其磁化率 κ 和剩余磁化强度 M_r 的计算公式如下^[2]:

在标本翻转以后得到相应的 ΔT_{+y} 、 ΔT_{-y} 、

$$\kappa = \frac{2\pi r^3}{T_0 V} \left(\frac{\Delta T_{+x} + \Delta T_{-x} + \Delta T_{+y} + \Delta T_{-y} + \Delta T_{+z} + \Delta T_{-z}}{6} \right) SI$$

$$M_r = \frac{5r^3}{2V} \sqrt{(\Delta T_{+x} - \Delta T_{-x})^2 + (\Delta T_{+y} - \Delta T_{-y})^2 + (\Delta T_{+z} - \Delta T_{-z})^2} \times 10^{-3} A/m$$

上两式当中, r 为标本中心到探头中心距离; V 为标本体积; ΔT_0 为当地地磁场总强度值, 单位 nT ; ΔT_l 为 ($l = \pm x, \pm y, \pm z$) 标本产生的磁场值, 单位 nT 。

需要说明的是: ①计算 κ 时, 只要 V 和 r^3 单位相同 (例如 r 的单位为 cm , 则 V 为 cm^3); 如果 T_0 和 ΔT_l 单位相同 (例如 T_0 和 ΔT_l 都为 nT) 即可。②计算 M_r 的公式 V 和 r^3 单位相同之外, 要求 ΔT_l 的单位必须是 nT , 否则后面所乘的指数项就需要做相

应改变。③用第一位置测定时, 各读数应满足下式, 因为只有这样才能保证所计算得到的磁化率值为正值。

$$\frac{\Delta T_{+x} + \Delta T_{-x}}{2}, \frac{\Delta T_{+y} + \Delta T_{-y}}{2}, \frac{\Delta T_{+z} + \Delta T_{-z}}{2} \geq T_0$$

(2) 梯度测量方式的第二位置计算公式

用同样的方法可推导出高斯第二位置的计算公式:

$$\kappa = \frac{4\pi r^3}{T_0 V} \left(\Delta T_0 - \frac{\Delta T_{+x} + \Delta T_{-x} + \Delta T_{+y} + \Delta T_{-y} + \Delta T_{+z} + \Delta T_{-z}}{6} \right) SI$$

$$M_r = \frac{5r^3}{V} \sqrt{(\Delta T_{+x} - \Delta T_{-x})^2 + (\Delta T_{+y} - \Delta T_{-y})^2 + (\Delta T_{+z} - \Delta T_{-z})^2} \times 10^{-3} A/m$$

用第二位置测定时, 各读数应满足:

$$\frac{\Delta T_{+x} + \Delta T_{-x}}{2}, \frac{\Delta T_{+y} + \Delta T_{-y}}{2}, \frac{\Delta T_{+z} + \Delta T_{-z}}{2} \leq T_0$$

综上所述可以看出, 上述两种测定方法计算公式的不同, 实际上是因为不同测量位置处的磁偶极子的磁场不同而造成的。

3 倾斜测定法和水平测定法

测定方法主要有倾斜测定法和水平测定法

(图 2)。这里所说的倾斜或水平指的是标本 (盒) 的放置方法。倾斜测定法是利用磁总场 T_0 直接计算磁参数, 水平测定法是将正常总场 T_0 , 以磁倾角 I_0 分解为垂直与水平分量, 它们共同对标本磁化, 并用分量合成来计算磁参数。

对倾斜测定法论述较多^[3-9], 目前为多数地勘单位采用。倾斜测定法沿袭磁秤法而来。磁秤法可以分为高斯第一位置、高斯第二位置和高斯第三位置。高斯第一位置和高斯第二位置都是利用磁秤测量磁场垂直分量来计算磁参数, 所谓高斯第三位置则是将磁系翻转, 测量磁场水平分量来计算磁参数。因为标量磁力仪测量地磁场总场, 只要把现在的地磁

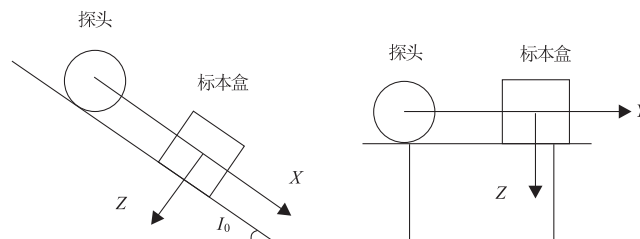


图 2 高斯第一位置的倾斜测定法 (a) 和高斯第二位置的水平测定法 (b)

Fig. 2 Tilt measurement method for the first Gauss position (a) and horizontal measurement method for the second Gauss position (b)

总场看作是过去的垂直场就可以了,只是磁化场不再是垂直向下的,而是向北倾斜的^[7]。因此倾斜法只有高斯第一位置和高斯第二位置。倾斜测定法需要事先知道地磁场倾角。

余惠祥在 1992 年提出了水平测定方法,对磁参数计算公式给出了详细的推导过程^[10],并且该方法被石油天然气行业的磁法勘探规范所采用。该水平测定法计算公式巧妙的省去磁倾角参数,故无需考虑地磁倾角。王庆乙等研究了水平测定法中的三种不同位置(第一位置、第二位置和第三位置),并且指出了第二位置适用全球水平测定磁参数^[11];其第一位置和第三位置与磁秤法中的高斯第一位置和高斯第三位置并不同,但第二位置与高斯第二位置实际上是相同的位置,也就是余惠祥提出的水平测定方法。

4 定向标本和非定向标本

对于非定向标本而言,如果不考虑标本自身形状对标本磁参数的影响,因为无需计算剩磁的倾角和偏角,无论是高斯第一位置还是高斯第二位置,无论标本盒是倾斜放还是水平放,理论上得到的磁化率 κ 和剩磁大小 M_r 是一样的。因为水平放置或者倾斜放置可以看成是标本在标本盒内的“姿态”不同而已。

对于定向标本,如图 3 采用右手坐标系对标本的 x 、 y 和 z 轴进行定义。倾斜测量时, x 轴正方向指向地磁场(T_0)方向, y 轴指向磁东。水平测量时, x 轴正方向指向磁北方向, y 轴指向磁东。但无论是倾斜放还是水平放,都可以使用得到的 M_{rx} 、 M_{ry} 和 M_{rz} 值计算标本的剩磁偏角、剩磁方位角和剩磁倾角,并且这样做使得计算更加简单。

令 $\varphi' = \text{atan} \frac{M_{ry}}{M_{rx}}$,由反正切函数与直角坐标系四个象限之间的关系,并根据偏角和方位角的定义得到剩磁偏角(φ)、剩磁方位角(φ_f)、剩磁倾角(θ)计算公式:

$$\varphi = \begin{cases} \varphi' (M_{rx} > 0) \\ \varphi' + \pi (M_{rx} < 0, M_{ry} > 0) \\ \varphi' - \pi (M_{rx} < 0, M_{ry} < 0) \end{cases}$$

$$\varphi_f = \begin{cases} \varphi' (M_{rx} > 0, M_{ry} > 0) \\ 2\pi + \varphi' (M_{rx} > 0, M_{ry} < 0) \\ \varphi' + \pi (M_{rx} < 0) \end{cases}$$

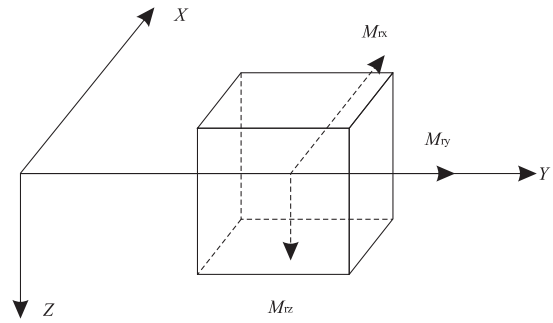


图 3 定向标本的放置^[12]

Fig. 3 Placement of oriented specimens

$$\theta = \text{atan} \frac{M_{rz}}{\sqrt{M_{rx}^2 + M_{ry}^2}}$$

以上三式中,剩磁偏角(φ)、剩磁方位角(φ_f)、剩磁倾角(θ)的单位都是弧度(rad); θ 为正值表示向下倾, θ 为负值表示向上倾。

使用已经计算得到的 M_{rx} 、 M_{ry} 和 M_{rz} 计算标本剩磁方向(在水平面投影)的方位角(或偏角)更加方便快捷。避免了对多次测值相减的正负值进行判断以确定角度方位的繁琐。

5 结语

磁参数测量是磁法勘探中的一个环节,对进行异常解释起着至关重要的作用,看似简单,但却有着实际的意义。对现有的测量磁参数的方法进行细致的解读,对获得合理的、可靠的测定数据具有一定的指导作用。通过对比分析发现,使用梯度方式更加方便;而使用高斯第二位置的水平测定法具有优势,该方法无需知道当地的地磁倾角;对于定向标本使用已经计算得到的 M_{rx} 、 M_{ry} 和 M_{rz} 计算标本剩磁方向的方位角(或偏角),能使角度的判断更加简便。

参考文献:

- [1] 管志宁. 地磁场与磁力勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 78-81.
- [2] 秦藻瑚, 李仁豪, 齐文秀, 等. 中华人民共和国地质矿产行业标准 DZ/T 0071—93, 地面高精度磁测技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [3] 马淑娟, 王喜臣, 禹惠民. 磁参数测量装置的设计原理及操作[J]. 吉林大学学报, 2006: 36(专辑): 204-206.
- [4] 樊金生, 张云明, 郭文波, 等. 用质子式磁力仪测定岩(矿)石标本几个问题的探讨[C]. 陕西地球物理文集(十)——资源与灾害地球物理, 2011: 175-178.
- [5] 成正国. 用 MP-4 高精度质子磁力仪测定岩(矿)石标本磁性习

- [J]. 物探与化探, 1992, 16(2): 150-152.
- [6] 樊彦超. 用 GSM-19T 微机质子磁力仪测定岩(矿)石标本磁性参数的方法及磁性参数实际工作中的应用[J]. 地球, 2014(7): 219-222.
- [7] 陈可明. 用 CHD-6 核子旋进磁力仪测定岩石标本磁参数的方法[J]. 物探与化探, 1983, 7(2): 98-104.
- [8] 王钟, 梁锦文. 磁参数工作中的几个问题[J]. 地质与勘探, 1979, 3(1): 55-62.
- [9] 李才明, 李军, 周拓宇. 用质子磁力仪测定岩(矿)石标本磁参数时应注意的问题[J]. 矿物岩石, 2004, 24(1): 105-107.
- [10] 余惠祥. 质子旋进磁力仪测定岩(矿)石标本磁参数的新方法[J]. 地质与勘探, 1992, 28(12): 34-39.
- [11] 王庆乙, 徐立忠, 闫伟. 质子磁力仪平测岩矿标本磁参数的装置与计算方法[J]. 物探与化探, 2013, 37(3): 508-511.
- [12] 杨占军, 王春玉, 齐保智. 中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 5771—2011, 地面磁法勘探技术规程[S]. 北京: 石油工业出版社, 2011.

Several problems for the scalar magnetometer-determined magnetic parameters of rock and ore specimens

LIANG Jian^{1,2}, HUANG Jinhui¹, XUE Yuefen¹, ZHANG Chuan¹

(1. China Metallurgical Geology Bureau geophysical prospecting Institute, Baoding 071051, Hebei, China;

2. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Magnetic parameter measurement is a key link in magnetic survey and plays an important role in anomaly interpretation. During gradient measurement gradient model is applied to make diurnal variation of the measured data. In this paper the first Gauss position and the second Gauss position is defined and the reason why calculation formula of the first Gauss position differs from that of the second Gauss position and the relationship between the horizontal and the tilt measurement discussed. For oriented samples the residual magnetic declination is different from the residual magnetic azimuth. The optimum magnetic measurement scheme is proposed.

Key Words: scalar magnetometer; magnetic parameters; gradient; horizontal measurement; tilt measurement