

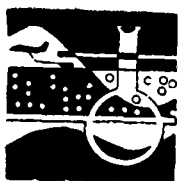
质子旋进磁力仪测定岩(矿)石标本磁参数的新方法

余惠祥

(中南工业大学地质系·长沙市)

本文介绍测量岩(矿)石标本磁参数的新方法,所用仪器为质子旋进磁力仪。阐述了方法的原理和测量技术。对测量误差及如何提高测定精度也作了分析。作者认为此法优于现有的其他方法。

关键词: 高精度质子旋进磁力仪; 总磁异常; 剩余磁化强度; 磁化率



物探与化探

为在高精度磁测过程中,及时了解岩(矿)石的磁性特征,指导磁测工作和正确解释磁测资料,必须在磁测工作的同时开展岩(矿)石磁性参数的测定和研究。

高精度质子旋进磁力仪,是目前野外高精度磁测广泛应用的仪器。原有的用高精度质子磁力仪测定岩(矿)石标本磁参数的方法,是将标本摆放在 T_0 与磁东西水平线所决定的倾斜面里进行标本的磁参数测定^[1]。在此将其简称为“倾斜测定法”,这种方法要有专门摆放标本的装置,但即使有了专用装置,在高磁纬度区,由于摆放标本的倾斜面陡,标本不易放稳、放准,如标本位置确定不准,会造成探头中心(观测点)到标本中心的距离(R)有偏差,由于在计算标本剩余磁化强度(J_r)和磁化率(κ)的公式中, J_r 和 κ 均与 R^3 成正比例,因此,由于距离不准而引起确定 J_r 和 κ 的百分相对误差 $m(R)$ 为: $m(R)=3dR/R \times 100\%$ (dR 为确定距离 R 的偏差)。当 $R=10\text{cm}$,确定 R 的偏差 dR 由 0.2cm 增至 0.3cm , $m(R)$ 由 6% 增至 9% ,也就是说,确定 R 的偏差 dR 增大 0.1cm 时,确定标本磁参数的总百分相对误差增加 3% 。对于地磁倾角 $I \geq 45^\circ$ 的中高纬度区,要在倾斜度大于或等于 45° 的斜面上放稳标本,且要使确定距离的偏差 $dR \leq 2 \sim 3\text{cm}$,这是很不容易的事。而且,若摆放标本的斜面不是向磁北倾斜,而是向北西或北东倾斜,将会带来另外的误差。

由于“倾斜测定法”的上述缺欠,本文提出一种新的测定方法,简称为“水平测定法”,其方法原理与测定方法如下。

方法原理

设磁性标本在观测点(探头中心) $P(x, y, z)$ 点产生的磁异常总矢量为 $\vec{T}_a$,其在坐标轴 x, y, z 方向的分量分别为 H_{ax}, H_{ay} 和 Z_a 。令坐标系 x 轴与正常地磁北的夹角为 A , z 轴向下为正,正常地磁场 $\vec{T}_0$ 的倾角为 I , $T_a \ll T_0$ 时(通过调节距离 R ,此条件总是可达

到的), 则标本在观测点产生的总磁异常 ΔT 为:

$$\Delta T = T - T_0 = H_{ax} \cos I \cos A + \cos I \sin A + Z_0 \sin I \quad (1)$$

式中 T 为高精度质子旋进式磁力仪, 在有标本存在时测得的值经日变改正后的总磁场值。对于等轴状标本, H_{ax} , H_{ay} 和 Z_a 分别为

$$\left. \begin{aligned} H_{ax} &= \frac{\mu_0 v [(J_{ax} + J_{rx})(2x^2 - y^2 - z^2) - 3(J_{ly} + J_{ry})xy - 3(J_{lz} + J_{rz})xz]}{4\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \\ H_{ay} &= \frac{\mu_0 v [(J_{ly} + J_{ry})(2y^2 - x^2 - z^2) - 3(J_{lx} + J_{rx})xy - 3(J_{lz} + J_{rz})yz]}{4\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \\ Z_a &= \frac{\mu_0 v [(J_{lz} + J_{rz})(2z^2 - x^2 - y^2) - 3(J_{lx} + J_{rx})xz - 3(J_{ly} + J_{ry})yz]}{4\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m})$, J_{ix} 与 J_{rx} , J_{iy} 与 J_{ry} , J_{iz} 与 J_{rz} 为均匀磁化体的感应磁化强度($\vec{J}$)和剩余磁化强度($\vec{J}_r$)在磁性体3个坐标轴向(x 、 y 、 z)方向的分量, v 为磁性体的体积, 单位为 cm^3 。

令坐标原点与探头中心 $P(x, y, z)$ 点重, 坐标 x 轴指向磁北, 标本中心 $Q(x_1, y_1, z_1)$ 点与探头的中心 $P(x, y, z)$ 点的连线 $PQ = R(\text{cm})$ 。当标本置于探头的正东或正西时 PQ 线与坐标 y 轴重(附图), 此时有:

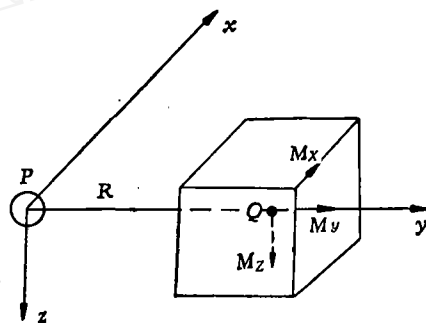
$A=0$, $y=R$, $x=z=0$ 。由式(1)和(2)则有

$$\Delta T = \frac{-\mu_0 v [(J_{ix} + J_{rx})\cos I + (J_{iz} + J_{rz})\sin I]}{4\pi R^3} \quad (3)$$

由于剩余磁化强度 J_{rx} , J_{ry} , J_{rz} 的方向是随标本的 x , y , z 轴改变而相应一致变化的, 所以当标本轴向(x , y , z)摆放的方向不同时, J_{rx} , J_{ry} 和 J_{rz} 的方向也不同, 此时在探头中心产生的总磁异常 ΔT 也将不同。设标本轴向不同指向时, 所测得的 ΔT 如附表所规定, 则有

标本不同指向时所测得标本总磁异常 ΔT

标本 x 轴指向	标本 y 轴指向	标本 z 轴指向	经日变改正后的总磁场 $T_1 (\text{nT})$	标本的总磁异常 $\Delta T_1 (\text{nT})$
水平指向磁北	水平指向磁东	铅垂向下	T_1	ΔT_1
水平指向磁北	水平指向磁西	铅垂向上	T_2	ΔT_2
水平指向磁南	水平指向磁东	铅垂向上	T_3	ΔT_3
铅垂向下	水平指向磁北	水平指向磁东	T_4	ΔT_4
铅垂向上	水平指向磁北	水平指向磁西	T_5	ΔT_5
铅垂向上	水平指向磁南	水平指向磁东	T_6	ΔT_6
水平指向磁东	铅垂向下	水平指向磁北	T_7	ΔT_7
水平指向磁西	铅垂向上	水平指向磁北	T_8	ΔT_8
水平指向磁东	铅垂向上	水平指向磁南	T_9	ΔT_9



标本与探头位置示意图

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_1 &= -\mu_0 v [(J_{1x} + J_{rx}) \cos I + (J_{1z} + J_{rz}) \sin I] / 4\pi R^3 \\ \Delta T_2 &= -\mu_0 v [(J_{1x} + J_{rx}) \cos I + (J_{1z} - J_{rz}) \sin I] / 4\pi R^3 \\ \Delta T_3 &= -\mu_0 v [(J_{1x} - J_{rx}) \cos I + (J_{1z} - J_{rz}) \sin I] / 4\pi R^3 \\ \Delta T_4 &= -\mu_0 v [(J_{1y} - J_{ry}) \cos I + (J_{1x} + J_{rx}) \sin I] / 4\pi R^3 \\ \Delta T_5 &= -\mu_0 v [(J_{1y} + J_{ry}) \cos I + (J_{1x} - J_{rx}) \sin I] / 4\pi R^3 \\ \Delta T_6 &= -\mu_0 v [(J_{1y} - J_{ry}) \cos I + (J_{1x} - J_{rx}) \sin I] / 4\pi R^3 \\ \Delta T_7 &= -\mu_0 v [(J_{1z} + J_{rz}) \cos I + (J_{1y} + J_{ry}) \sin I] / 4\pi R^3 \\ \Delta T_8 &= -\mu_0 v [(J_{1z} + J_{rz}) \cos I + (J_{1y} - J_{ry}) \sin I] / 4\pi R^3 \\ \Delta T_9 &= -\mu_0 v [(J_{1z} - J_{rz}) \cos I + (J_{1y} - J_{ry}) \sin I] / 4\pi R^3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由(4)式求得标本剩余磁化强度 J_r 为:

$$J_r = \frac{2\pi R^3}{\mu_0 v} [(\Delta T_2 - \Delta T_1)^2 + (\Delta T_3 - \Delta T_2)^2 + (\Delta T_5 - \Delta T_4)^2 + (\Delta T_6 - \Delta T_5)^2 + (\Delta T_8 - \Delta T_7)^2 + (\Delta T_9 - \Delta T_8)^2]^{1/2} \times 10^{-9} [\text{A/m}] \quad (5)$$

$\vec{J}_r$ 的偏角 φ_r 为:

$$\varphi_r = \text{tg}^{-1} \left[\frac{(\Delta T_6 - \Delta T_5)^2 + (\Delta T_8 - \Delta T_7)^2}{(\Delta T_3 - \Delta T_2)^2 + (\Delta T_5 - \Delta T_4)^2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$\vec{J}_r$ 的倾角 i_r 为:

$$i_r = \text{ctg}^{-1} \left[\frac{(\Delta T_3 - \Delta T_2)^2 + (\Delta T_5 - \Delta T_4)^2 + (\Delta T_6 - \Delta T_5)^2 + (\Delta T_8 - \Delta T_7)^2}{(\Delta T_2 - \Delta T_1)^2 + (\Delta T_9 - \Delta T_8)^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

由(4)式又有

$$\Delta T_1 + \Delta T_3 = \frac{-\mu_0 v (J_{1x} \cos I + J_{1z} \sin I)}{2\pi R^3} \quad (8)$$

由附表所示测定标本总磁异常 ΔT_1 的条件, 则有

$$J_{1x} = \kappa'_x T_0 \cos I / \mu_0$$

$$J_{1z} = \kappa'_z T_0 \sin I / \mu_0$$

式中 κ'_x 和 κ'_z 分别为标本 x 轴向 z 轴向的视磁化率。若标本的真磁化率为 κ , 标本 x 、 y 和 z 轴向的消磁系数分别为 N_x 、 N_y 和 N_z , 对于等轴状磁性标本则有

$$N_x = N_y = N_z = \frac{1}{3}; \quad \kappa_x = \kappa_y = \kappa_z = \kappa' = \frac{\kappa}{1 + \frac{\kappa}{3}}$$

由此得

$$J_{1x} = \kappa' T_0 \cos I / \mu_0$$

$$J_{1z} = \kappa' T_0 \sin I / \mu_0$$

将此代入(8)式得

$$\kappa' = \frac{-2\pi R^3 (\Delta T_1 + \Delta T_3) \times 10^{-9}}{v T_0} \quad [SI\kappa]$$

同理可得

$$\kappa' = \frac{-2\pi R^3 (\Delta T_4 + \Delta T_6) \times 10^{-9}}{v T_0} \quad [SI\kappa]$$

$$\kappa' = \frac{-2\pi R^3 (\Delta T_7 + \Delta T_9) \times 10^{-9}}{v T_0} \quad [SI\kappa]$$

将上面三式相加求 κ' 的平均值得

$$\kappa' = \frac{-2\pi R^3 (\Delta T_1 + \Delta T_3 + \Delta T_4 + \Delta T_6 + \Delta T_7 + \Delta T_9) \times 10^{-9}}{3v T_0} \quad [SI\kappa] \quad (9)$$

式中 T_0 单位为“特”(T), ΔT_i 的单位为“纳特”(nT)。

由(9)式结果可进而求得标本的真磁化率 κ :

$$\kappa = \frac{3\kappa'}{3 + \kappa'} \quad [SI\kappa] \quad (10)$$

岩(矿)石标本磁参数测定方法步骤

1. 准备工作

- (1) 选择一处磁场平稳、附近无干扰源的地区作为岩(矿)石标本测定之场地。
- (2) 准备一块 $>40 \times 40 \text{ cm}^2$ 的无磁性平板, 将平板在选定的工作场地中铺平、固定, 在其上沿磁南北和磁东西方向画“十”字交叉线。
- (3) 将整理好的立方体标本(或正方形标本盒)标上 x 、 y 、 z 轴。
- (4) 准备好测量标本体积(v)和量度距离(R)的量具及其他用具。
- (5) 选择二台噪声小的仪器, 分别用作日变和测量标本。
- (6) 将日变仪器置于无磁性干扰的安静处, (或野外工作的日变站上) 进行日变观测。

2. 标本总磁异常测量

- (1) 将探头置于准备好的平板十字交点上, 使探头中心与十字交点同在一铅垂线上, 且探头激励磁场的方向朝磁东或磁西, 然后向仪器输入“1001”线号和“0000”点号, 记录无标本时的地磁场 T_{01} 。
- (2) 将标本置于准备好的平板上, 使标本中心与画好的磁东西线上的点在同一铅垂线上, 而标本中心与探头中心保持在同一水平面里, 并按附表要求摆好标本的轴向(即首先使标本 x 轴水平朝北, 标本 z 轴朝下), 用仪器测点号键, 每转动一次标本轴向, 输入一个标本编号“ x ”($x=1, 2, \dots, 9$), 并记读 T_i 值, 直至 $T_1 = T_9$ 为止, 取下标本, 则第一块标本测量完毕。

(3) 向仪器输入“1002”线号“0000”点号; 并记读无标本的地磁场 T_{02} 值。

(4) 放上标本, 重复步骤(2), 测量完第二块标本。如此重复步骤(2)和(3), 测第三块、第四块…至第 n 块标本。

3. 标本测定结果的初步整理

因为磁性体总磁异常 $\Delta T = T - T_0$, 当考虑测定标本总磁异常时的日变影响, 则每块标本第 i 个轴向的总磁异常 ΔT_i 为

$$\Delta T_i = T_i + \delta T_i - T_0 \quad (11)$$

式中 δT_i 为读取 T_i 时的日变改正值, T_0 为测定标本场地的地磁场值, 其值由下式确定:

$$T_0 = T_{01} + \delta T_{01} \quad (12)$$

式中 δT_{01} 为记读 T_{01} 时的日变改正值, T_{01} 为无标本时所测得的工作场地的地磁场值。因为测定标本的场地一般选在稳定磁场区,所以 $T_0 (=T_{01} + \delta T_{01})$ 为一常数。由不同时间“ $T_{01} + \delta T_{01}$ ”值的偏差大小,可以检查标本测定时仪器的稳定性及磁场观测的精度。

将(11)式代入(5)式、(6)式和(7)式中,并令

$$\left. \begin{aligned} A &= (T_2 - T_1 + \delta T_2 - \delta T_1)^2 + (T_9 - T_8 + \delta T_9 - \delta T_8)^2 \\ B &= (T_3 - T_2 + \delta T_3 - \delta T_2)^2 + (T_5 - T_4 + \delta T_5 - \delta T_4)^2 \\ C &= (T_6 - T_5 + \delta T_6 - \delta T_5)^2 + (T_8 - T_7 + \delta T_8 - \delta T_7)^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

则可求得标本剩余磁化强度的有关参数

$$J_r = \frac{2\pi R^3}{\mu_0 v} (A + B + C)^{1/2} \times 10^{-9} \quad [\text{A/m}] \quad (14)$$

$$\varphi_r = \text{tg}^{-1} \left(\frac{C}{B} \right)^{1/2} \quad (15)$$

$$i_r = \text{tg}^{-1} \left(\frac{B + C}{A} \right)^{1/2} \quad (16)$$

将(11)式代入(9)式则可求得标本视磁化率 κ' 值:

$$\begin{aligned} \kappa' &= \frac{-2\pi R^3}{v T_0} [(T_1 + T_3 + T_4 + T_6 + T_7 + T_9) + (\delta T_1 + \delta T_3 + \delta T_4 + \delta T_6 \\ &\quad + \delta T_7 + \delta T_9) - 6T_0] \times 10^{-9} \quad [SI(\kappa)] \end{aligned} \quad (17)$$

式中 T_0 单位为“特”(T), T_i 和 δT_i 单位为“纳特”(nT)。

求得 κ' 后,将其代入(10)式,求标本的真磁化率 κ 值。

一个区域内,所有标本的 J_r 、 φ_r 、 i_r 和 κ 值的进一步统计整理,可按大家熟悉的有关方法进行。

标本参数测定误差分析

为便于进行测定误差分析,将 J_r 的表达式(5)和 κ' 的表达式(9)写成如下通式:

$$J_r = \frac{2\pi R^3}{\mu_0 v} \left[\sum_{i=1}^6 (\Delta T_{i+1} - \Delta T_i)^2 \right]^{1/2} \times 10^{-9} \quad (\text{A/m}) \quad (5')$$

$$\kappa' = \frac{-2\pi R^3}{3v T_0} \sum_{i=1}^6 \Delta T_i \times 10^{-9} \quad [ST(\kappa)] \quad (9')$$

根据误差理论,由(5')式和(9')式可求得确定 J_r 的百分相对误差 m_{J_r} 和确定 κ' 的百分相对误差,分别为:

$$m_{J_r} = \frac{dJ_r}{J_r} \times 100\% = \left[\frac{3dR}{R} + \frac{dv}{v} + \frac{\sum_{i=1}^6 (\Delta T_{i+1} - \Delta T_i)(d\Delta T_{i+1} - d\Delta T_i)}{\sum_{i=1}^6 (\Delta T_{i+1} - \Delta T_i)^2} \right] \times 100\% \quad (18)$$

$$m_k = \frac{d\kappa'}{\kappa'} \times 100\% = \left[\frac{3dR}{R} + \frac{dv}{v} + \frac{dT_0}{T_0} + \frac{\sum_{i=1}^6 d\Delta T_i}{\sum_{i=1}^6 \Delta T_i} \right] \times 100\% \quad (19)$$

由于 dT_0/T_0 非常小,可忽略不计。因此不论是 J_i 还是 κ' ,其测定误差不外乎是测定距离 R 的偏差 dR ,测定标本体积 v 的偏差 dv 和测定标本总磁异常 ΔT_i 的偏差 $d\Delta T_i$ (或 $d\Delta T_{i+1}$)这三方面的原因所引起。其中 dv 引起的误差相对较小,例如,对 $6 \times 6 \times 6$ 的立方体标本, $v = 216\text{cm}^3$,若 $dv = 10\text{cm}^3$,则 $(dv/v) \times 100\% \leq 5\%$;确定距离 R 的偏差 dR 对确定磁参数的误差是至关重要的,令 $R = 10\text{cm}$ 、 $dR = 0.2\text{cm}$ 时,则 $\left(\frac{3dR}{R}\right) \times 100\% = 6\%$,当 $dR = 0.5$

cm时, $\left(\frac{3dR}{R}\right) \times 100\% = 15\%$ 。因为 R 的真实含义是标本中心(严格说为标本磁矩中心)到探头的距离,对于未经特殊加工的非标准几何形体标本,或将标本装在标本盒中,要使距离偏差 $dR \leq 0.5\text{cm}$,也不容易,对于非均匀磁化标本,这简直是不可能的。当然,确定距离不准而引起标本磁参数出现较大的误差,对于任何方法都是存在的。区别在于,不同的方法确定距离准确程度有所不同。

采用高精度质子旋进磁力仪器测定岩(矿)石标本的磁参数,因测定标本总磁异常 ΔT_i (或 ΔT_{i+1})的偏差 $d\Delta T_i$ (或 $d\Delta T_{i+1}$)一般较小。所以由 $d\Delta T_i$ 引起确定标本磁参数的误差,主要取决于 ΔT_i (或 ΔT_{i+1})的大小。当 ΔT_i (或 ΔT_{i+1})较大时,则 $d\Delta T_i$ 引起参数误差较小,而当 ΔT_i (或 ΔT_{i+1})较小时,尽管 $d\Delta T_i$ (或 $d\Delta T_{i+1}$)较小,而比值 $\sum_{i=1}^6 (\Delta T_{i+1} - \Delta T_i)(d\Delta T_{i+1} - d\Delta T_i) / \sum_{i=1}^6 (\Delta T_{i+1} - \Delta T_i)^2$ 和 $\sum_{i=1}^6 d\Delta T_i / \sum_{i=1}^6 \Delta T_i$ 仍然可能较大。标本总磁异常 ΔT_i (或 ΔT_{i+1})的大小不仅与标本的磁性强弱有关,还与标本的体积 v 大小及距离 R 有关。当岩(矿)石标本磁性一定时,标本体积增大或距离缩小,则可增大总磁异常 ΔT_i ,但这时可能使标本磁矩保持偶极子的条件遭到破坏,从而使前述测定方法原理的前提条件不再得到满足。

综合上述分析,为保证磁参数的测定精度,除应尽量减小偏差 dv 、 dR 、 $d\Delta T_i$ 外,一个极重要的措施是,野外测定的标本体积不宜过小,应保持在 $6 \times 6 \times 6 \sim 10 \times 10 \times 10\text{cm}^3$ 。这样在磁性一定的情况下,可增大 ΔT_i ;或保证一定 ΔT_i 时,可适当增大 R 。也就是说,适当增大标本的体积,有利于提高标本磁参数测定总精度。另外,为使标本中心与标本磁偶极子中心重合,所采标本应是荷质均匀的岩(矿)石,且标本尽量为正方形或球形。对于岩心标本,应使其圆柱体的高与直径相等。

参考文献

- [1] 秦葆珊、张昌达等,《高精度磁法勘探》,中南工业大学出版社,1988年。