

第四章 野外磁测工作方法

磁法勘探工作一般包括以下四个阶段：

1 设计阶段：接受任务后，应着手收集与工区有关的地质、物性（主要是岩矿石的磁性）及前人的物探、地形等资料，并到施工现场踏勘。在此基础上编写工作设计。对工作任务、测区、测网、比例尺、方法技术、磁测精度及人员编制、仪器设备、工作进度、施工顺序及经费预算等问题按磁测规范的要求做出设计报审批。

2、野外施工阶段：包括磁力仪的检查、日变站的选择、磁异常的观测、质量检查、室内整理计算、图件编制、标本采集与测定，及资料的验收等。

3、数据处理阶段：根据所获得的磁测资料及地质任务，提出相应的数据处理方案，为磁异常的分析解释提供资料。

4、报告编写阶段：进行定性、定量分析与综合解释，并按设计要求编写成果报告。

自 20 世纪 80 年代中期以来，我国磁测工作无论地磁、航磁及海洋磁测均使用高精度磁测仪器，仪器的分辨率已经达到 0.1nT,可以提取数纳特的有效信息，为此制定了相应的工业规范，上述各阶段的具体内容与技术要求可参阅相应的规范。本章仅对磁测野外工作中的基本问题作简要介绍。

第一节 野外磁测工作设计

一、测区、比例尺和测网的确定

测区范围应根据任务要求和工区地质、矿产及以往物化探工作等情况合理确定。尽量使磁测结果轮廓完整规则，并尽可能包括地质、物探工作过的地段，周围有一定面积的正常场背景，以利于数据处理与解释推断。

基础地质调查的磁测工作比例尺，应等于相应地质工作比例尺或较大一级比例尺。其线距大体为该工作比例尺图上一厘米所代表的长度，点距可根据需要选定，一般为线距的 1/10~1/2。普查性磁测工作的线距不大于最小探测对象的长度，点距应保证至少有三个测点能反映有意义的最小异常。详查或勘探性磁性工作，应有 5 条测线通过主要磁异常或所要研究的地质体，点距应满足反映异常特征的细节及解释推断的需要，尽可能密一些。测线应垂直于测区内总的走向或主要探测对象的走向，必要时可在同一测区内布置不同方向的测线。

常用比例尺的线距、点距列于表 4-1-1，表中线距变动范围为 2%。

对于航空磁测，一般情况下区域性航空磁测最大比例尺为 1:20 万，最小比例尺为 1:100 万；综合性与油气勘查为主的航空磁测最大比例尺为 1:5 万，最小比例尺为 1:10 万；专属性航空磁测最大比例尺为 1:1 万，最小比例尺为 1:10 万。当测区内平均离地飞行高度不能低于 250 米时，不宜进行大于 1:5 万的航空磁测；高差大于 600m 的山区，不宜进行大于 1:20 万的航磁。

表 4-1-1 比例尺与测网密度的对应关系

磁测比例尺	长方形测网			正方形测网	
	线距(米)	点距(米)	每平方公里测	线距=点距	每平方公里测

			点数	(米)	点数
1: 50000	500	50-250	40-8	500	4
1: 25000	250	25-100	100-40	250	16
1: 10000	100	10-50	1000-200	100	100
1: 5000	50	5-20	4000-1000	50	400
1: 2000	20	4-10	12500-5000	20	2500
1: 1000	10	2-5	50000-20000	10	10000
1: 500	5	1-2	200000-100000	5	40000

为了方便，表 4-1-1 中列出了不同磁测比例尺每平方公里内观测点的数目。

同一个异常用不同的测网密度，对异常的反映往往是不一样的。

如图 4-1-1 是我国某镍矿区不同测网所获得的磁异常结果。图 (a) 用 50×10 (米²) 的测网，图 (b) 是 50×20 (米²) 的测网，图 (c) 是 100×40 (米²) 的测网。将图 (a) 和图 (b) 比较可以看出异常形态基本一致，而同图 (c) 比较则发生很大变化。图 (c) 的测网显然没有控制住异常形态。很明显，在该区采用 50×20 (米²) 的测网是适宜的。

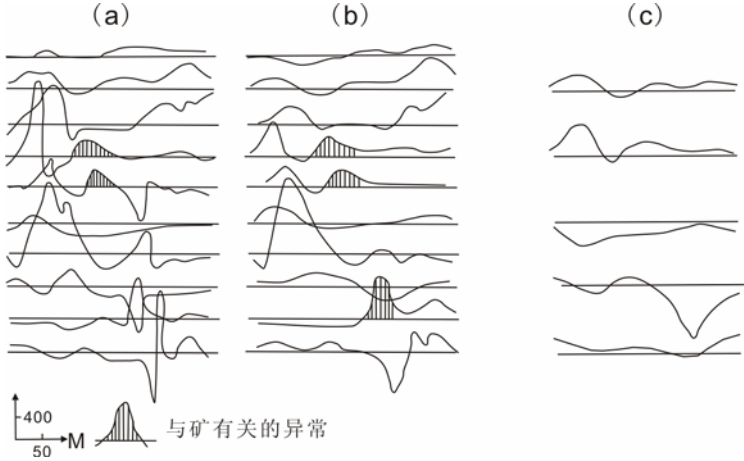


图 4-1-1 不同测网密度的磁测结果

为了正确选择测网形状和密度，通常要考虑一下两个因素：

(一) 异常研究程度

当普查找矿时，线距应不大于要找的范围最小异常的长度，点距应保证测线穿过异常时，有三个测点落在异常的范围之内，以便异常与磁测中产生的较大的偶然误差、观测或计算造成的孤立点“异常”相区别。有时也用“点距小于有效异常宽度之半”的提法。按误差理论，大于三倍均方误差（磁测精度）的异常值的范围称为有效异常宽度，若点距小于有效异常宽度之半，那么一般 2-3 个测点会落在有效异常宽度之内。当详查时，应在普查结果的基础上加密测网，使异常的形态特征能反映出来。按经验一般至少要有 5-7 条测线穿过异常，点距应保证异常曲线连续，使得再加密测网时异常形态无变化。

(二) 异常的形态和规模

当根据实际踏勘或小比例尺磁测资料已掌握异常具有一定走向时，应采用长方形测网，测线方向与异常走向垂直。当异常走向不明显时，则采用方形测网。测网密度还要考虑异常规模大小。如果异常规模很大，较小的比例尺即可满足掌握异常特征的需要，这时增大比例尺则是无益的。实际异常经常是很复杂的，因此在观测异常的过程中，根据对异常的进一步认识，应适当的修改测网，使其更符合客观实际的要求。

二、磁测精度

(一) 磁测质量的均方误差与平均相对误差

磁测工作中是以偶然误差的大小来反映磁测质量的。野外磁测中异常的真值是未知数，只能做到等精度的重复观测。所以，衡量磁测质量的均方误差常采用如下计算公式

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (B_{i1} - B_{i2})^2}{2N}} \quad (4-1-1)$$

式中： B_{i1}, B_{i2} 分别为第*i*个检查点上不同时间两次等精度的观测值， N 为检查点数。若同一观测点上检查观测次数多于两次，则可用式（4-1-2）计算均方差：

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K (B_{ij} - \bar{B}_i)^2}{M - N}} \quad (4-1-2)$$

式中： K 为多于两次以上重复观测次数， M 是（ $N \times K$ ）全部检查点重复观测的总次数； \bar{B}_i 为第*i*点上*K*次重复观测的平均值。

对于异常磁场，可用平均相对误差来衡量，其计算公式为：

$$\bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|B_{i1} - B_{i2}|}{|B_{i1} + B_{i2}|} \times 100\% \quad (4-1-3)$$

式中： $\bar{\eta}$ 为平均相对误差； n 为异常场检查的点数； B_{i1} 、 B_{i2} 分别为第*i*个检查点原始观测值和检查观测值。

图 4-1-2 为我国山东某地不同磁测精度的磁测结果对比。图中曲线为异常等值线，1957 年在这个地区进行磁测，均方误差为 $\pm 33\text{nT}$ ，精度较低，异常形态受到歪曲，等值线分布不规律，因而当时这个异常被忽略了。1966 年重新工作，磁测均方误差为 $\pm 7\text{nT}$ ，精度较高，等值线的分布很有规律，明显的存在一个北西向的规则异常，经钻孔 CK211 验证，该异常为磁铁矿引起。充分说明磁测精度不同、地质效果也不同。故在观测弱异常时需较高的精度。图中所示两次观测的异常数值不同，是两次工作选用了不同基点所致。

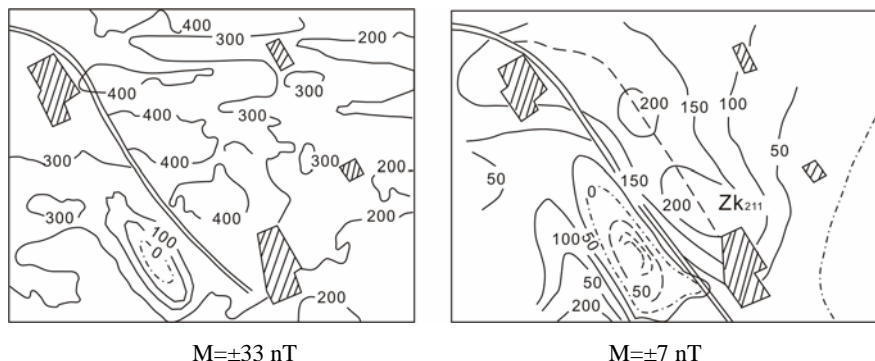


图 4-1-2 不同磁测精度的磁测结果

(二) 磁测精度的确定

磁测工作所采用的仪器类型不同，其磁测精度也不同。目前我国已全部使用高精度的电

子式磁力仪（质子，光泵磁力仪），根据仪器的实际情况，将磁测分为三个等级：

高精度 均方误差 ≤ 5 nT

中精度 均方误差 6 nT—15 nT

低精度 均方误差 > 15 nT

其中均方误差小于 2 nT 的高精度磁测定为特高精度磁测。

采用何种磁测精度，首先要考虑磁测的地质任务，探测对象的最小有意义的磁异常强度（ $B_{\max \text{低}}$ ）。根据误差理论知道，大于三倍均方误差的异常是可信的。而根据物探图件要求，能正确刻划某地质体异常形态至少要有两条非零的等值线，等值线的间距不得小于三倍均方误差。因此，通常确定磁测精度为 $m < (\frac{1}{5} - \frac{1}{6}) B_{\max \text{低}}$ 。在考虑上述原则的同时，在不影响完成磁测约定的主要任务下，照顾到将来磁测资料的综合利用可适当提高磁测精度。

（三）磁测精度的保证

确定了磁测精度后，为了达到规定的精度，这就需要对各个环节的独立因素的误差进行分配：仪器性能的选择及调节，若有多台仪器在同一工区施工，必须作仪器一致性检查。假定仪器的均方误差为 m_1 ；基点及基点网建立的均方误差为 m_2 ；野外磁异常观测均方误差为 m_3 ；消除干扰的各项改正的均方误差为 m_4 ；整理计算的均方误差为 m_5 ；其他因素为 m_6 。根据误差理论：总观测精度的均方误差平方等于各个独立因素均方误差的平方之和。所以，为了保证磁测精度的实现，必须满足如下的误差分配公式，即

$$m^2 \geq m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + m_5^2 + m_6^2$$

磁测工作各环节的精度确定之后，即可确定相应的工作方法。这项工作是磁法勘探设计的重要环节。

第二节 野外施工

一、地面磁测

（一）基点、基点网的建立

为了将观测结果换算到统一的水平，在磁测工作中要建立基点。基点分为总基点，主基点及分基点。总基点和主基点主要作用为观测磁场的起算点。当测区面积很大必须划分几个分工区进行工作时，必须设立一个总基点；若干个分工区的主基点，形成一个基点网；分基点的主要作用为测线观测时控制仪器性能的变化。根据工区面积大小和磁测结果的改正方法，来确定是否需要设立分基点和形成分基点网，见图 4-2-1。

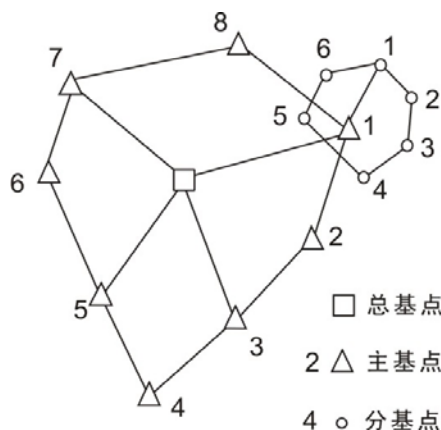


图 4-2-1 基点布置图

对各类基点的选择须有严格要求。在组成基点网或分基点网后，必须用仪器进行连测，连测时要求在日变幅度小和温差较小的早晨或傍晚前短时间内进行闭合观测，若主基点（或分基点）很多，可以分成具有公共边的若干个闭合环进行连测，可以选用多台仪器一次往返观测，或用一台仪器多次往返观测。

由连测的结果计算均方误差和误差分配，要求连测的均方误差小于总均方误差的二分之一。如果多环连测必须进行平差。

（二）磁场的日变观测

在高精度磁测时必须设立日变观测站，以便消除地磁场周日变化和短周期扰动等影响，这是提高磁测质量的一项重要措施。

日变观测站，必须设在正常场（或平稳场）内，温差小、无外界磁干扰和地基稳固的地方，观测时要早于出工的第一台仪器，晚于收工的最后一台仪器。日变观测站仪器采用自动记录方式，记录时间应不大于 0.5min。

日变站有效作用范围与磁测精度有关，低精度测量时，一般在半径 50~100km 范围之内，可以认为变化场差异微小；高精度磁测时，最大有效范围一般以半径 25km 设一个站为宜。

（三）测线磁场观测

要按照磁测工作设计书规定的野外工作方法技术严格执行。针对不同磁测精度，不同观测仪器和不同校正方法，采用不同的野外观测方法，但每天测线观测都是始于基点而终于基点，对建立分基点网的，要求测量过程中 2~3 小时闭合一次分基点观测。

若使用高精度质子磁力仪观测时，必须用一台同类仪器按上述要求进行日变观测，对野外观测记录作日变校正即可。

野外观测时，切忌仪器操作员和持仪器探头人员携带磁性物品。要注意地质、地形和干扰物的记录，以便分析异常时使用，如发现明显异常要随时注意合理加密测线、测点、追索异常，以便准确地确定异常形态。

（四）质量检查

质量检查的目的是了解野外所获得异常数据的质量是否达到了设计的要求。这是野外工作阶段贯彻始终的重要环节。

质量检查的基本要求：要有严格检查量，平稳场检查点数要大于总测点数的3%，绝对数不得少于30个点。异常场检查点数为总检查点数的5%~30%。前者采用均方误差评价，计算公式为(4-1-1)，并以正态分布图表示；后者采用平均相对误差评价，计算公式为(4-1-3)，可用异常场检查对比剖面图表示。

磁测的质量检查评价以平稳场的检查为主。检查观测应贯穿于野外施工的全过程，做到不同时间、同点位、同探头高度。

二、梯度测量

在地面、航空、海洋磁测中直接进行磁场的垂直梯度或水平梯度测量，能获得更多反映场源特点与细节的资料，对磁异常的解释十分重要。

目前磁梯测量常用两种方式：一种是水平磁梯度测量；另一种是垂直磁梯度测量，均是用两个探头以一定间隔水平或垂直放置测定其差值，使用的仪器类型有磁通门、质子旋进与光泵等磁力仪。

我国从20世纪90年代开始研制航磁水平梯度系统。在2002年研制成稳定的高灵敏度HC-2000型航空氦光泵磁力仪基础上由三个探头组成梯度测量系统，机翼两侧探头间距为22.7米，机翼两侧探头连线中点距尾探头间距为13.19米。光泵仪器的收录系统在飞行测量时可同时获得机翼左、右探头和尾探头测得并经过磁补偿改正后的磁场总场数据，左、右探头磁场总场差值以及左右探头磁场总场平均值与尾探头的磁场总场差值。取得了面积性的高质量沿测线和垂直测线水平梯度数据。

三、卫星磁测

上个世纪五十年代以来，世界各国相继发射人造地球卫星，它们携带磁力仪进行近地地磁场测量，主要有：1958年，前苏联发射了Sputnik3卫星，平面倾角 65° ，高度范围226-1881 km，携带磁通门(标量)磁力仪，可达到的异常精度100nT。1979年，美国发射了一颗与太阳同步的Magsat卫星，平面倾角 97° ，高度范围325-550 km，携带磁通门(矢量)与铯光泵(标量)磁力仪，可达到的异常精度分别为6nT与3nT。2000年，德国发射了一颗圆形轨道的CHAMP卫星，平面倾角 87.3° ，高度范围300-460 km，携带磁通门(矢量)与欧弗豪泽质子(标量)磁力仪，可达到的异常精度分别为2nT与1nT。

磁卫星的分辨率可达150~300km。磁卫星异常与地质构造有较好的相关性，展现了研究全球构造的广阔应用前景。

第三节 观测结果的计算整理与图示

一、观测结果的资料计算

磁场观测结果的整理计算与野外选用的仪器及工作方法有着密切的关系。在某个测点上观测值 B_i 是各种因素引起的磁场的叠加，而磁测目的是要提取所研究对象的磁异常

ΔB_i (Za 或 ΔT)，因此其它因素引起的磁场均为校正场，它们与地磁场及背景场有关的，

如正常地磁场或正常背景场的校正 B_0 ，正常地磁场改正目前我国规范规定统一采用国际地磁参考场IGRF。若用国际地磁参考场IGRF改正后还不满足正常场选择的要求，还可以根据实际情况加上或减去一个常数；与经纬度有关的正常地磁场水平梯度校正 B_1 ，若用国际地磁参考场IGRF改正，其本身就包含了水平梯度改正，此时就不必再做水平梯度改正；正常地磁场垂直梯度校正 B_2 ；地磁日变校正 B_3 。因此，可写成如下通式：

$$\Delta B = B_i \pm B_{i0} \pm B_{i1} \pm B_{i2} \pm B_{i3} \quad (4-3-1)$$

垂直梯度校正 B_2 现在也可以用国际地磁参考场IGRF作正常场改正时同时进行，以前的做法是在球谐级数展开的一级近似下得出沿垂向的磁场梯度来计算的：

$$\frac{\partial T_0}{\partial R} = -\frac{3T_0}{R}$$

R 为地球半径，6371000 m，当 $T_0 = 50000nT$ 时，地磁场垂向梯度为 $-0.024nT/m$ ，高差 30m 时，地磁场垂向变化可达 $-0.72nT$ 为例，约每 42m 高差改正 $1nT$ ，比总基点高 42m 加 $1nT$ ，反之则减 $1nT$ 。

在设置基点网的大面积磁测工作中，应将各基点起算的磁测结果统一为相对于总基点的异常值，这项工作称为基点改正。如某工区基点磁场比总基点高 $150nT$ ，则工区内异常值相对减小了 $150nT$ ，因此工区的基点改正值应是 $+150nT$ 。

二、磁测的图件

可分为磁测基础图件（野外观测的磁异常剖面平面图和磁异常平面等值线图），数据处理图件（经计算机处理的图件，如延拓、化极等）和解释图件（反演解释的结果），后两类图件是在基础图件基础上根据不同目标任务所作的不同图件，将在第六章、第七章介绍，本节仅介绍磁测基础图件。

在磁测工作中，反映测区磁异常特征的基本图件有三种：即磁异常综合剖面图，磁异常剖面平面图和磁异常平面等值线图，见图 4-3-1 至 4-3-3。目前，上述图件均由计算机自动成图。

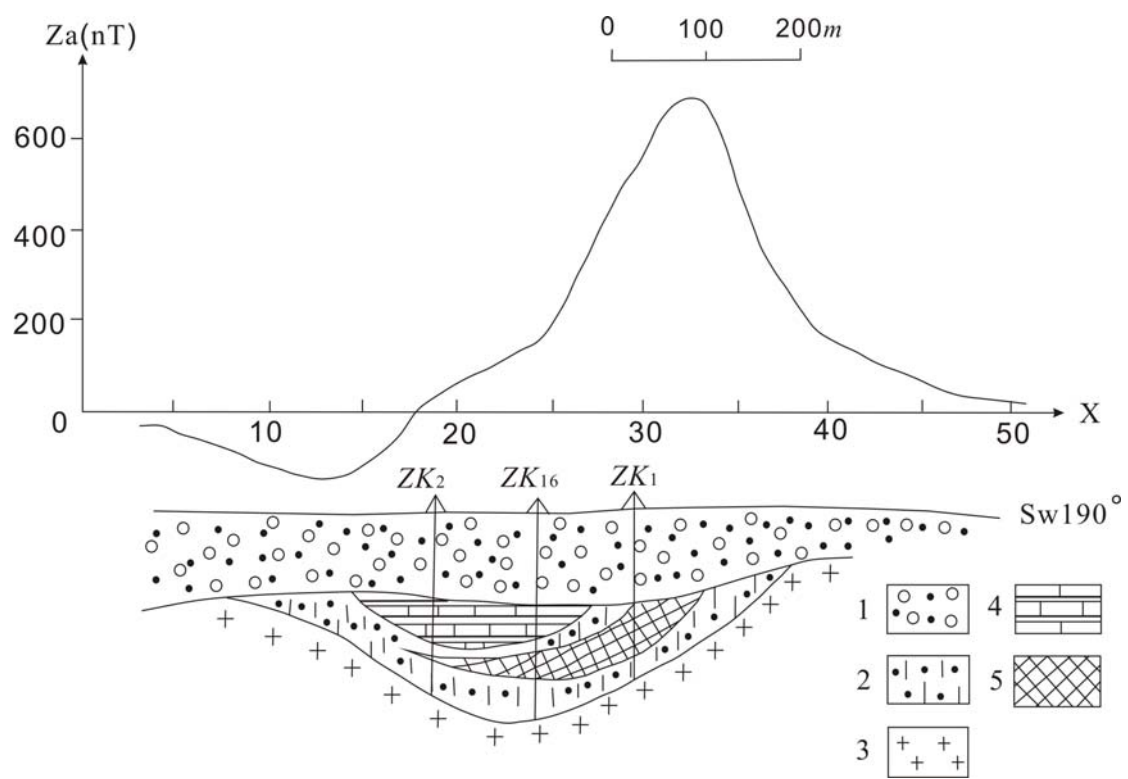


图4-3-1 磁异常综合剖面图

1.—表土； 2.—砂卡岩； 3.—闪长岩； 4.—灰岩； 5.—铁矿⁺

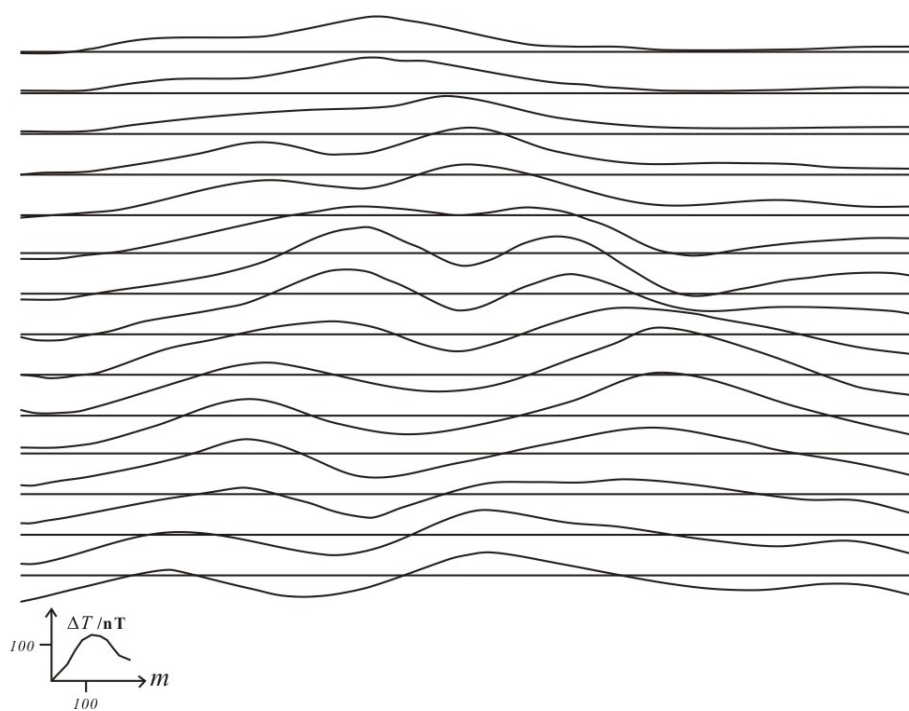


图4-3-2 磁异常剖面平面图

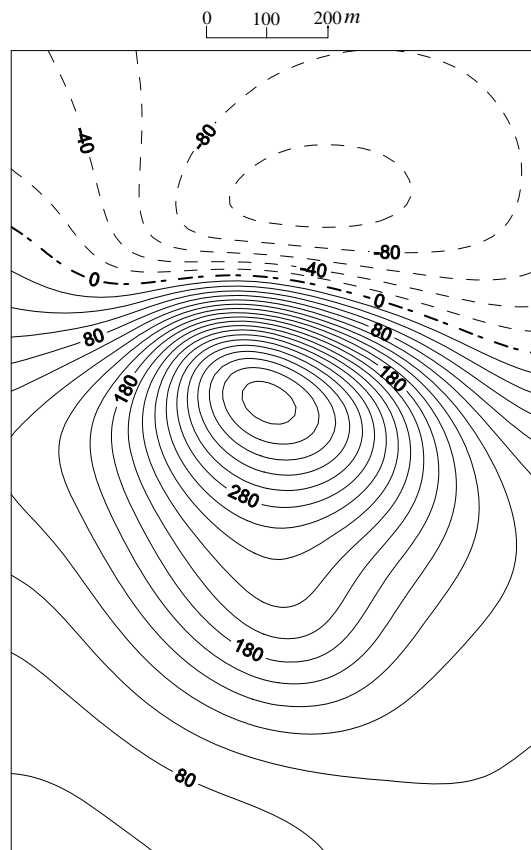


图 4-3-3 磁异常平面等值线图

第四节 岩矿石磁参数的测量与统计整理

一、岩矿石标本的采集

采集用来研究岩矿石磁性的标本时,除了要专门研究岩矿石风化壳磁性特征这种情况之外,均应采集岩矿石的基岩露头或钻井的岩心等。为了满足物性参数统计需要,各类岩矿石标本采集数量一般不能少于 30 块,采集点要均匀分布。标本形状尽可能为等轴状(或立方体),体积应以 $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$ 为宜,即使强磁性标本也不能小于 400cm^3 。

为了研究岩矿石剩余磁化强度的大小和方向,需要采集定向标本,也就是要确定标本在原露头上的空间位置。一般用三种定向标志来确定,即在采集标本的露头上画出两个方向上的水平线确定水平面,标出水平面的上、下方确定其垂直轴,并在标本上标出磁北方向箭头,见图 4-4-1。然后,用地质锤等工具打下标本,最后对标本进行编录登记。

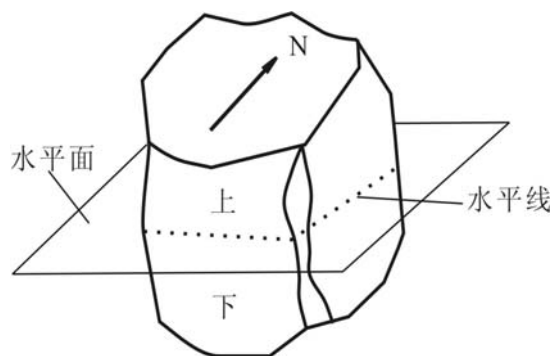


图 4-4-1 采集定向标本

二、标本磁参数测定

(一) 磁秤法

按标本相对于磁系不同的放置位置，可分高斯第一和第二两种位置进行磁性测定。前者适用于强磁性标本测定，一般可测磁化强度大于 $1500 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ ；后者用于弱磁性标本，可测 $(400 \sim 500) \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 的磁性。高斯第二位置测定时，因标本放置位置的不同，又可分为两种方法，一种称为磁秤法第二位置测定法（见图 4-4-2，4-4-3），另一种称为磁秤法第三位置测定法。

测定时若是定向标本则将标本置于立方体标本盒中，两者中心要一致，标本上磁北方向为 x 轴方向， y 轴指东为正，标本的水平面与 xOy 平面平行，这时标本向下即为 z 轴之正向，在盒内固定好后即可测定。最后测出标本的体积 V ，再进行计算。

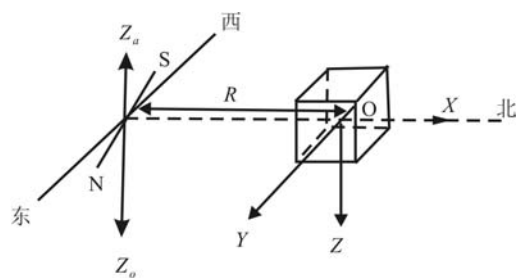


图 4-4-2 磁秤法高斯第二位置图

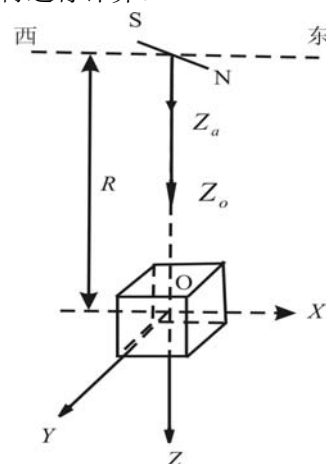


图 4-4-3 磁秤法高斯第一位置图

1. 第二位置测定法

高斯第二位置是将标本中心处于磁系旋转轴的延长线上（即北或南），此时磁系中心处于标本受地磁场垂直分量 Z_0 磁化的某个垂直轴间偶极子的中垂线上。如图4-4-4所示。此时，磁系中心点的磁场为

$$Za = \frac{\mu_0 m_z}{4\pi R^3}$$

式中 m_z 为标本总磁矩 m 在 z 轴方向上的投影分量，应有：

$$m_z = (M_{iz} + M_{rz}) \cdot V$$

假定未放标本时仪器读数为 n_0 ，置入标本 z 轴正向时读数为 n_5 ，标本绕 y 轴（即固定一个轴的方向）旋转 180° 后，反向读数为 n_6 ，则有：

$$\varepsilon(n_0 - n_5) \cdot 10^{-9} = \frac{\mu_0 (M_{iz} + M_{rz}) \cdot V}{4\pi R^3}$$

$$\varepsilon(n_0 - n_6) \cdot 10^{-9} = \frac{\mu_0(M_{iz} - M_{rz}) \cdot V}{4\pi R^3}$$

解上述两式，便可分别求得 M_{iz} 和 M_{rz} ，而 $M_{iz} = \kappa' \cdot Z_0 / \mu_0$ 。故有

$$\kappa'_z = \frac{\varepsilon(n_0 - \frac{n_5 + n_6}{2}) \cdot 4\pi R^3 \cdot 10^{-9}}{Z_0 V} \quad (\text{SI})$$

$$M_{rz} = \frac{\varepsilon(\frac{n_6 - n_5}{2}) \cdot 4\pi R^3 \cdot 10^{-9}}{\mu_0 V} \quad (\text{A/m}) \quad (4-4-1)$$

同样，分别在 x 和 y 轴测定时，正、反向读数为 n_1, n_2 和 n_3, n_4 。取以上读数分别替代上述两式中的读数项，便可得相应的 k'_x, M_{rx} 和 κ'_y, M_{ry} 。于是可求得平均视磁化率 κ' ，

剩余磁化强度 M_r 及方位角 φ （与磁北的夹角）和倾角 θ ，计算公式如下

$$\kappa' = \frac{1}{3}(\kappa'_x + \kappa'_y + \kappa'_z), M_r = (M_{rx}^2 + M_{ry}^2 + M_{rz}^2)^{1/2} \quad (4-4-2)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{M_{ry}}{M_{rx}}\right), \theta = \arctan\left[\frac{M_{rz}}{(M_{rx}^2 + M_{ry}^2)^{1/2}}\right]$$

若在测定过程中，能保持标本中心至磁系中心距离 R 不变，则以上公式直接可与读数联系起来简化计算，则有

$$k' = \frac{2\pi R^3 \varepsilon}{3Z_0 V} [6n_0 - (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6)] \cdot 10^{-9} (\text{SI})$$

$$M_r = \frac{2\pi R^3 \varepsilon}{\mu_0 V} [(n_2 - n_1)^2 + (n_4 - n_3)^2 + (n_6 - n_5)^2]^{1/2} \cdot 10^{-9} (\text{A/m}) \quad (4-4-3)$$

$$\varphi = \arctan \frac{(n_4 - n_3)}{(n_2 - n_1)}, \theta = \arctan \frac{n_6 - n_5}{[(n_2 - n_1)^2 + (n_4 - n_3)^2]^{1/2}}$$

2. 第三位置测定法

磁秤法第三位置测定法与高斯第二位置测定法原理完全一样，只是将磁系旋转了一个方位角，使 N 极指南，这时由于地磁场水平分量 H_0 的作用，使仪器灵敏度提高，所以可测定更弱一些标本的磁性。计算公式仍用（4-4-3），而仪器的格值（ ε ）要用测定标本时，仪器磁系所在方位测得的格值常数来参与计算。

由上述计算公式知道，磁秤法第二、三位置测定标本读数必须满足如下条件，即

$$\frac{n_1 + n_2}{2}, \frac{n_3 + n_4}{2}, \frac{n_5 + n_6}{2} \leq n_0 \quad (4-4-4)$$

磁秤法第一位置测定法，是将标本中心置于磁系中心正下方，见图 4-4-3。

(二) 质子磁力仪梯度方式测定

质子磁力仪测定岩石磁性时，其测定装置的探头轴向置于南北方向，标本盒放在一个无磁性合页板的倾斜板面上，倾斜板面的倾角应与当地地磁倾角 I_0 一致，倾斜面朝北，置于探头轴向两侧东或西使标本盒中心与下探头的中心在同一水平面上。显然，此装置同于高斯第二位置测定法。但标本测量轴受地磁 T_0 磁化。靠近标本的探头测量正常场和标本的叠加的磁场，而远离标本的探头测量正常场。当测定地点的磁场均匀，即正常梯度为零（或有很小底数），则放置标本时的梯度计数（TH）即为标本所产生的磁场。

测定时，将仪器的线号键(Line)置于标本编号，点号键(Station)按标本盒上三个轴向的正向号码(如 z 轴正向为 5)并绕 z 轴(即 T_0 方向)每旋转 90° 读取一个数编入 501, 502, 503, 504, ……，其余轴向号码一样。个位上的数表示某个轴的正、反向读数。百位上的数表示该轴的四次读数，也就是采用 24 次读数法，目的是减少标本形状不规则、磁性不均匀和标本位置误差的影响，所以取四次读数平均值来代表该轴向读数，如

$$n_5 = \frac{TH501 + TH502 + TH503 + TH504}{4} \quad (4-4-5)$$

依次可以读得：放入标本后读数 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 、 n_5 、 n_6 。如各读数满足条件：

$$\frac{n_1 + n_2}{2}, \frac{n_3 + n_4}{2}, \frac{n_5 + n_6}{2} \leq 0, \text{ 即可按下述公式计算磁化率:}$$

$$\kappa' = \frac{4\pi \cdot R^3}{3T_0 V} \left[\left| \frac{n_1 + n_2}{2} \right| + \left| \frac{n_3 + n_4}{2} \right| + \left| \frac{n_5 + n_6}{2} \right| \right] \times 10^{-9} (SI) \quad (4-4-6)$$

式中， R 为标本中心到探头中心距离，单位：cm； V 为标本体积，单位： cm^3 ； T_0 为当地总磁场值，单位：特斯拉。若用 GS 制表示则为奥斯特或高斯，如地磁场强度约 0.5Oe，计算时取 0.5。此时要把奥斯特换算为特斯拉， $1T=10^4Gs=10^4Oe$ 。

$$\text{剩磁: } M_r = \frac{5 \cdot R^3}{V} [(n_2 - n_1)^2 + (n_4 - n_3)^2 + (n_6 - n_5)^2]^{1/2} \times 10^{-3} (A/m) \quad (4-4-7)$$

为了使所测数据可靠，希望标本所产生的磁场 $\geq 1nT/m$ ，这可通过调节 R 来实现。

还可采用高斯第一位置测定，即把标本置于探头轴向的北侧，并使倾角为 I_0 倾斜板放置标本后，使通过标本中心的 Z 轴（平行 T_0 方向）的延长线交于下探头中心。此时的距离 R 为沿 T_0 方向的斜距。如各读数满足条件： $\frac{n_1 + n_2}{2}, \frac{n_3 + n_4}{2}, \frac{n_5 + n_6}{2} \geq 0$ 。可应用第一位置

公式计算 κ' 和 M_r ：

$$\kappa' = \frac{\pi \cdot R^3}{3T_0 V} \left[\left| \frac{n_1 + n_2}{2} \right| + \left| \frac{n_3 + n_4}{2} \right| + \left| \frac{n_5 + n_6}{2} \right| \right] \times 10^{-9} (SI) \quad (4-4-8)$$

$$M_r = \frac{5 \cdot R^3}{2 \cdot V} [(n_1 - n_2)^2 + (n_3 - n_4)^2 + (n_5 - n_6)^2]^{1/2} \times 10^{-3} (A/m) \quad (4-4-9)$$

以上测得磁化率均视为视磁化率，可利用近似球体标本的计算公式求得其真磁化率 κ ，即

$$\kappa = \frac{\kappa'}{1 - \frac{\kappa'}{3}} \quad (4-4-10)$$

(三) 质子磁力仪总场方式测定

方法与梯度方式类似，在此只列出两种方式的不同之处：

(1)、利用梯度方式对岩石标本进行磁测时，该仪器的上下两个探头同时进行测量，读数只需记录放置标本后的 TH 梯度读数，当两个探头的距离较小时，TH 梯度读数相当于标本所产生的磁场；总场方式需要两台仪器进行测量：一台置于平稳磁场区用于地磁场的日变观测，另一台仪器用于对岩石标本的测量，工作时，需记录未放置标本时仪器的读数 n_0 以及放置标本后的仪器读数 n_i ，($i=1,2,\dots,6$)，记录的方法同梯度方式。

(2)、利用梯度方式进行磁测工作时，仪器的读数为标本产生的磁场强度；利用总场方式测量时，仪器的读数为该测量地点的总磁场强度。

利用总场方式计算岩石标本磁性参数的公式：

高斯第一位置：

$$\text{磁化率 } \kappa' : \quad \kappa' = \frac{\pi \cdot R^3}{3T_0 V} \left[\left| \frac{n_1 + n_2}{2} - n_0 \right| + \left| \frac{n_3 + n_4}{2} - n_0 \right| + \left| \frac{n_5 + n_6}{2} - n_0 \right| \right] \times 10^{-9} (SI) \quad (4-4-11)$$

$$\text{剩磁 } M_r : \quad M_r = \frac{5 \cdot R^3}{2 \cdot V} [(n_1 - n_2)^2 + (n_3 - n_4)^2 + (n_5 - n_6)^2]^{1/2} \times 10^{-3} (A/m) \quad (4-4-12)$$

高斯第二位置：

$$\text{磁化率 } \kappa' : \quad \kappa' = \frac{2\pi \cdot R^3}{3T_0 V} \left[\left| n_0 - \frac{n_1 + n_2}{2} \right| + \left| n_0 - \frac{n_3 + n_4}{2} \right| + \left| n_0 - \frac{n_5 + n_6}{2} \right| \right] \times 10^{-9} (SI) \quad (4-4-13)$$

$$\text{剩磁 } M_r : \quad M_r = \frac{5 \cdot R^3}{V} [(n_2 - n_1)^2 + (n_4 - n_3)^2 + (n_6 - n_5)^2]^{1/2} \times 10^{-3} (A/m) \quad (4-4-14)$$

式中，R：标本中心到探头中心距离，单位：cm；

V：标本体积，单位：cm³；

T₀：当地地磁场总强度值，T₀为当地总磁场值，单位：特斯拉。若用 GS 制表示则为奥斯特或高斯，如地磁场强度约 0.5Oe，计算时取 0.5。此时要把奥斯特换算为特斯拉，1T=10⁴Gs=10⁴Oe。

以上测得磁化率均为视磁化率，可利用球体退磁系数求得真磁化率 κ ，如 (4-4-10) 式。

三、磁参数统计整理和图示

磁性参数是受复杂地质因素制约的一种随机变量。统计的目的是以每一类岩（矿）石标

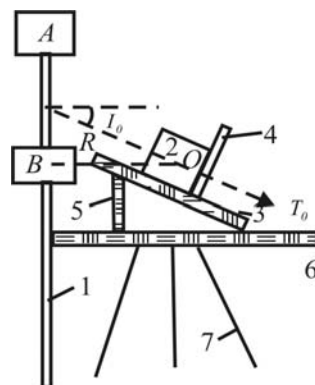


图 4-4-4 测定标本磁性装置图

A, B 分别为上、下探头；1.探头支杆；
2.标本盒；3.可调倾角的斜板；4.选择 R 及
固定标本盒的活动插销；5.调节倾角的螺杆；
6.可作水平转动的平板；7.三脚支架

本所测得的一批不同参数的随机变量中找出它们常见值和常见变化范围。由于磁参数一般均满足算术正态分布或对数正态分布的规律。因此，磁参数统计一般采用两种统计方法，即统计计算和统计图示。

(一) 磁参数的统计特征值的计算

1、 平均值

$$(1) \text{ 算术平均值} \quad \kappa_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \kappa_i \quad (4-4-15)$$

$$(2) \text{ 几何平均值} \quad \kappa_R = \left(\prod_{i=1}^n k_i \right)^{1/2} \quad (4-4-16)$$

$$(3) \text{ 加权平均值} \quad k_s = \sum_{i=1}^n m_i \bar{k}_i / \sum_{i=1}^n m_i \quad (4-4-17)$$

上式中的 m_1, m_2, \dots, m_n 为参加平均的各组数据的个数，作权系数； $\bar{k}_1, \bar{k}_2, \dots, \bar{k}_n$ 为各组数据的平均值。 m 值最大的一组数据中的中值，称为该批数据的常见值。当数据满足正态分布规律，数据量很大时，平均值和常见值 (k_c) 相等，所以可用平均值代替常见值。

2. 离散特征值

(1) 均方差：一批数据中各个数据与平均值（或常见值）之差平方和的均方根称为均方差（方差），按所用平均值不同，可分为

$$\text{算术均方差:} \quad \sigma_m = \pm \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})^2 \right]^{1/2} \quad (4-4-18)$$

$$\text{几何均方差:} \quad \lg \sigma_g = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg k_i - \overline{\lg k_g})^2 \right]^{1/2} \quad (4-4-19)$$

式中 $\overline{\lg k_g}$ 为 $\lg k_i$ 的平均值。均方差越大，说明测定的数据越离散；均方差较小，则数据越集中于平均值附近。

(2) 常见变化范围：

一般以常见值加減 0.5~2 倍均方差作为参数的常见变化范围；即 $k_c \pm (0.5 \sim 2) \sigma_g$ 。一

般情况下常以 $k_c \pm \sigma_g$ 来确定其变化范围。

(二) 统计图示

利用统计图示的方法统计特征数，一般步骤是：统计分组，编制统计表，绘制直方图，频率曲线及玫瑰图等，在此基础上由图上确定其统计特征数值。

1. 统计分组

按实测数据的个数和数据的变化范围，将其分成若干组，组的间隔长度称为组距，组距可按等差或等比划分。首先由数据个数在图 4-4-5 中找出分组数；根据数据变化范围和参考分组数确定组距列表统计每组内所占数据的个数（称频数），由总个数计算各组数据个数的频率，见表 4-4-1。于是按统计对象作相应的统计图件。

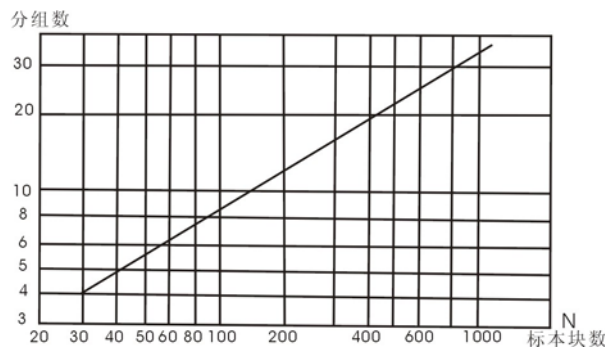


图 4-4-5 确定统计组数的经验曲线

表 4-4-1 磁参数统计整理和图示

组距	0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5
各组中值	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25
频数 m	1	3	14	21	41	31	19	8	5	3	2
频率 m/n (100%)	0.7	2.1	9.5	14.1	27.7	20.9	12.9	5.4	3.3	2.0	1.4
累计频率	0.7	2.8	12.3	26.4	54.1	75.0	87.9	93.3	96.6	98.6	100

2. 频率直方图和频率分布曲线

根据表 4-4-1 以磁化率分组值为横坐标，以频率为纵坐标，便可绘制出频率直方图。若连接各组的中值即得频率分布曲线。见图 4-4-6。如果该统计的磁参数满足正态分布规律，则频率分布曲线应为对称曲线，极值对应的横坐标为常见值 (k_c)，而极大值的 0.6 倍对应的横坐标范围为常见变化范围。当曲线不对称时，可利用直方图的最大值组的两个顶点与其相邻的两侧最近角点，其对角连线的交点所对应的横坐标为常见值。根据此交点可以近似求出圆滑后的极值，用同上方法可求得常见变化范围。

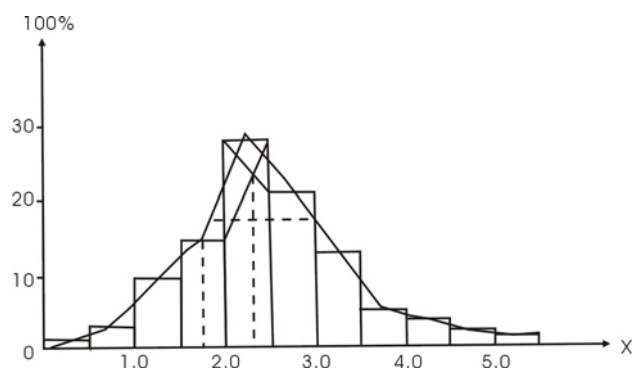


图 4-4-6 频率直方图曲线和频率分布曲线

3. 累积频率曲线

累积频率曲线用正态概率纸制图。纵坐标为累积频率，横坐标为分组值，以分组的右端值点连接即得累积频率曲线。若统计参数符合正态分布，则该曲线应为直线。但由于各种复杂因素的影响，所得曲线不一定为直线，但中间区段应接近直线。图4-4-7就是根据表4-4-1数据绘制的，累积频率曲线基本符合要求。

确定统计特征值的方法：经纵轴的 50%的水平线与统计曲线交点对应的横坐标为常见值。以 15.9%和 84.1%区段的交点所对应横坐范围为常见变化范围，得常见值 2400×10^{-3} (SI)，

常见变化范围 $(1700\sim3300) \times 10^{-3}$ (SI)。根据常见变化范围之半确定均方差。

4.玫瑰图

极坐标的射线表示角度，等间距的同心圆表示频率。统计方位角 φ 用全圆，射线自 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。统计剩磁倾角用 θ 半圆，射线自 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。作圆时，将 φ 和 θ 分组统计的各组中值及其频率值点到极坐标纸上，然后依次连接各点即绘得玫瑰图，见图4-4-8。其玫瑰图的长轴方向即为 φ 和 θ 角常见值。

对角度的统计图示，还可作球面分布图。

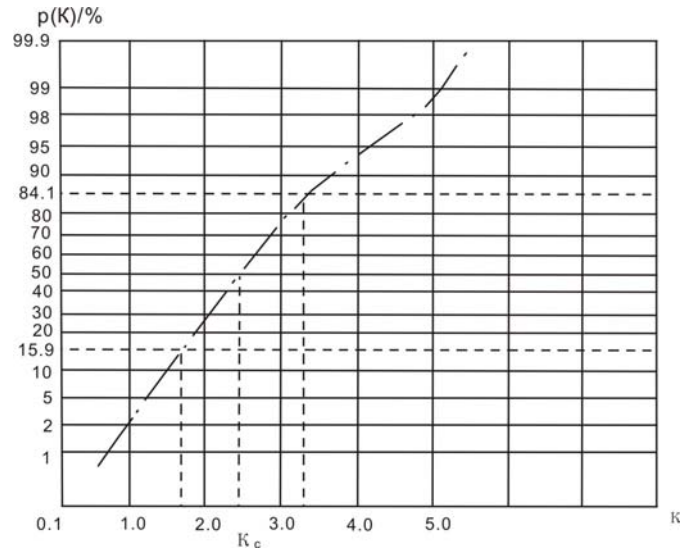
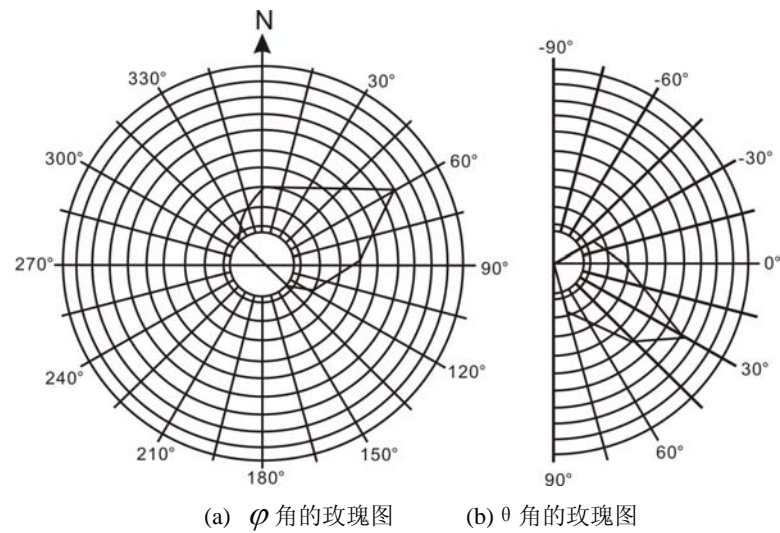


图4-4-7 累积频率曲线



(a) φ 角的玫瑰图 (b) θ 角的玫瑰图

图4-4-8 玫瑰图统计剩磁方向

习 题

1. 如何确定磁测工作的比例尺及测网密度？
2. 怎样选择磁测工作的精度？衡量磁测精度的标准是什么？
3. 高精度磁测进行东西方向长剖面测量时是否要考虑正常梯度校正（地形是水平的）？为什么？若要校正则提出校正的方法。

4. 磁秤法测定岩(矿)石标本磁性的第一、二位置的工作原理是什么?
5. 应用质子磁力仪测定标本磁性参数的原理与磁秤法对比有何同异?
8. 应用质子磁力仪测定标本磁性参数的梯度方式与总场方式有何同异?
7. 简述岩石磁参数统计的累积频率曲线与玫瑰图的作法, 及统计特征值的确定。

发展趋势与本章参考文献

对地球磁场的观测由地面、井中、海洋与航空发展到太空, 1958 年前苏联发射第一颗人造地球卫星 Sputnik3, 携带磁通门(标量)磁力仪, 异常精度 100nT; 1979 年美国发射 Magsat 卫星, 携带磁通门(矢量)与铯光泵(标量)磁力仪, 异常精度分别为 6,3 nT; 德国发射 CHAMP 卫星, 携带磁通门(矢量)与欧弗豪泽质子(标量)磁力仪, 异常精度分别为 2,1 nT。对磁场的观测参数也由标量发展到矢量, 由单一分量发展到多分量, 梯度以及张量。

最近, 航空磁测的一个重要进展是利用超导磁力仪进行航空全张量磁力梯度(full tensor magnetic gradiometry)的测量, 即测量地磁场矢量三个分量在三个方向上的空间变化率。有的地球物理学家认为, 磁法勘探下一次突破很可能是全张量磁力梯度的测量和解释应用。

测量地磁场矢量三个分量的空间变化率, 是目前各国地球物理学家的研究和开发的热点。测量地磁场矢量三个分量的空间变化率, 使用矢量磁力仪(分量磁力仪), 如磁通门磁力仪和超导磁力仪(SQUID), 后者又分为高温(77°K, 使用液氮冷却)的和低温(4° K, 使用液氦冷却)的两种。两种超导磁力仪分别简写为 HTS SQUID 和 LTSSQUID。SQUID 受到科学家们的特别青睐。将 SQUID 设计成梯度装置, 可测量地磁场矢量三个分量的空间变化率, 测得所谓的磁梯度张量。从理论上考虑, 利用张量梯度代替总磁场梯度有许多优点: 张量元素是真正的位场; 由一、二个测站的测量结果, 梯度张量就可直接确定指向磁性源的方向; 梯度张量可直接算出源的磁矩; 全梯度张量测量可以确定磁性源在飞行测线的哪一边; 并且抗干扰能力强等等。

澳大利亚自从 20 世纪 70 年代发现约瑟夫逊结(Josephson junction)和 SQUID 之后, 即开展超导体的研究。1987 年发现高温超导体之后, 组织专门研究这类新的陶瓷材料, 在制备和应用方面取得了进展。2000 年, 用一个双-SQUID 差分梯度仪做了初步试验之后, 开始执行一项磁张量梯度仪的研究开发计划, 研发一种可以测量全部九个地球磁场张量要素的 HTSSQUID 系统。澳大利亚正在执行一项研究地球浅层的庞大计划——透视地球(Glass Earth), 其中包括研制航空张量磁梯度仪 GETMAG (Glass Earth Tensor Magnetic Airborne Gradiometer, GETMAG)。梯度仪的灵敏度优于 0.01 nT/m, 基线长度(两磁力仪传感器间的距离)3cm。GETMAG 可以探测几百米深处, 磁化率差别只有 600 μ SI 的地质现象。

参考文献

1. 谭承泽, 郭绍雍 磁法勘探教程, 地质出版社, 1984
2. 管志宁 地磁学与磁力勘探, 地质出版社, 2005
3. 罗孝宽, 郭绍雍 应用地球物理教程-重力磁法, 地质出版社, 1991
4. 武汉地质学院、成都地质学院、河北地质学院、合肥工大合编: 应用地球物理学—磁法教程, 地质出版社, 1980
5. 张胜业, 潘玉玲 应用地球物理原理, 中国地质大学出版社, 2004
6. 长春地质学院磁法教研室: 磁法勘探, 地质出版社, 1979
7. 董焕成 磁法勘探教程, 地质出版社, 1993
8. 刘天佑 应用地球物理数据采集与处理, 中国地质大学出版社, 2004
9. 中华人民共和国地质矿产行业标准(DZ/T0071-93)地面高精度磁测技术规程, 1993
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, 地质与勘探, 1992, 28 (12): 34~39
11. 张昌达. 航空磁力梯度张量测量——航空磁测技术的最新进展. 工程地球物理学报, 2006, 3(5): 354~361.