第三章 磁力仪

磁法勘探是研究地质构造和找矿勘探的一种重要的地球物理方法，它通过磁力仪来测量地磁场和磁异常，通常把采集磁场数据和测定岩石磁参数的仪器称为磁力仪。

从20世纪初至今，磁法勘探仪器经历了由简单到复杂，由利用机械原理到利用现代物理原理与电子技术的发展过程。本章主要介绍几种不同类型磁力仪的基本原理。

第一节 概述

一、磁力仪的类别

按照磁力仪的发展历史，以及它们所应用的物理原理，可分为：

第一代磁力仪　它是根据永久磁铁与地磁场之间相互力矩作用原理，或利用感应线圈以及辅助机械装置制作的，如机械式磁力仪、感应式航空磁力仪等。

第二代磁力仪　它是根据核磁共振特征，利用高磁导率软磁合金，以及复杂的电子线路制作的，如质子磁力仪、光泵磁力仪及磁通门磁力仪等。

第三代磁力仪　它是根据低温量子效应原理制作的，如超导磁力仪。

磁力仪按其内部结构及工作原理，大体上可分为：①机械式磁力仪。如悬丝式磁秤、刃口式磁秤等；②电子式磁力仪。如质子磁力仪、光泵磁力仪、磁通门磁力仪等。

磁力仪按其测量的地磁场参数及其量值，可分为：①相对测量仪器，如悬丝式垂直磁力仪等，它是测量地磁场垂直分量Z的相对差值；②绝对测量仪器，如质子磁力仪等，它是测量地磁场总强度T的绝对值；不过亦可测量梯度值。

若从磁力仪使用的领域来看，它们可分为：地面磁力仪、航空磁力仪、海洋磁力仪以及井中磁力仪。

二、磁力仪的主要技术指标

技术指标是反映仪器总体性能的技术参数，通常包括：灵敏度、精密度、准确度、稳定性、测程范围等等。

灵敏度 系指磁力仪反映地磁场强度最小变化的能力（敏感程度），有时也称作分辨率。

对于用数码显示器读取磁场值的仪器（如质子磁力仪），在其读数装置上估读的最小可辨别的变化，称为显示灵敏度（或读数能力），如 1nT/字，0.1nT/字等。由于仪器有一个噪声水平问题，因此灵敏度与显示灵敏度在概念上是有区别的。

精密度 它是衡量仪器重复性的指标，系指仪器自身测定磁场所能达到的最小可靠值。由一组测定值与平均值的平方偏差表示。在仪器说明书中称为自身重复精度。

准确度 系指仪器测定真值的能力，即与真值相比的总误差。

在磁法勘探工作中，通常把精密度与准确度不予区分，统称为精度。

第二节 机械式磁力仪

机械式磁力仪是磁法勘探中最早使用的一类仪器。1915 年阿道夫·施密特刃口式磁秤问世，20 世纪 30 年代末出现凡斯洛悬丝式磁秤，它们成为广泛使用的两种地面磁测仪器。

它们都是相对测量的仪器。因其测量地磁场要素的不同，又分为垂直磁力仪及水平磁力仪。前者测定 $\boldsymbol{Z}$ 的相对差值，后者测定平面矢量 $\boldsymbol{H}$ 在两个方位上的相对值。

一、悬丝式垂直磁力仪

仪器的核心部分由磁系组成。磁系主要是一根圆柱形磁棒，它悬吊在铬、镍、钛合金恒弹性扁平丝的中央，丝的一端固定于扭鼓，另一端固定于弹簧，压于压丝台上。工作时磁系旋转轴（悬丝）应是水平的，磁棒摆动面严格垂直于磁子午面。打开仪器开关后，磁棒绕轴摆动。它受到地磁场垂直强度力、重力及悬丝扭力三个力矩的作用，当力矩相互平衡时，磁棒会停止摆动。

如图 3-2-1 所示，垂直分量 $\boldsymbol{Z}$ 的变化 $\Delta\boldsymbol{Z}$ 可引起 θ 角的变化（$\Delta\theta$），当偏转范围不超过 2° 时，由 θ 角的变化引起的仪器读数变化与 $\Delta\boldsymbol{Z}$ 成正比。据此可利用 $\Delta\theta$ 引起的读数变化测量 $\Delta\boldsymbol{Z}$ 的值。

在仪器结构上，利用光系将偏转角 θ 放大并反映为活动标线在标尺上的偏离格数。

我们假设在基点上，地磁场垂直分量为 $\boldsymbol{Z}_1$，仪器读数为 $\boldsymbol{S}_1$；在测点上，地磁场垂直分量为 $\boldsymbol{Z}_2$，仪器读数为 $\boldsymbol{S}_2$。则它们之间的垂直分量差值为

$$\Delta\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{Z}_2-\boldsymbol{Z}_1=\varepsilon(\boldsymbol{S}_2-\boldsymbol{S}_1) \qquad (3\text{-}2\text{-}1)$$

上式表明，悬丝式垂直磁力仪可以测量两点之间地磁场的相对变化，即用于相对测量。式中 ε 是一个常数，它代表每一个读格的磁场值，叫做格值。格值的倒数为灵敏度，通过调节 h 以改变灵敏度，h 为重心 $\boldsymbol{P}$ 点到支点垂直轴方向距离（见图 3-2-1）。

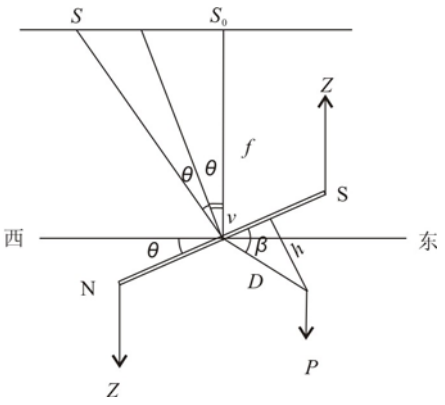


图 3-2-1 悬丝式垂直磁力仪磁系工作原理图



图 3-2-2 CS2-61G 型悬丝磁力仪

图 3-2-2 是国产 CS2-61G 型悬丝磁力仪。

二、其他机械磁力仪

我国 20 世纪 60 年代引进机械式磁力仪，在其基础上经不断研制、改进设计，其定型产品除 CS2-61G 型（见图 3-2-2）外，还有其他型号仪器如表 3-2-1 所示。

表 3-2-1

型号	名称	格值/nT·格$^{-1}$	稳定性/格	观测精度/nT	测程范围/nT
CSC-3	悬丝式垂直磁力仪	1	＜0.5	≤±5.0	±2000
CR_2-69	刃口式垂直磁力仪	1.8~2.2	≤0.3	≤±2.0	±3000
CSX_1-70	袖珍垂直磁力仪	20~25	≤0.1	≤±25.0	±20000~±25000
CSS-1	定向水平磁力仪	8~12	≤0.1	≤±5.0	±16000~±32000
CRT_1-69	地磁日变记录仪	2.0~2.5	≤0.3	24 小时内日变记录精度≤2.0	

表中 CSC-3 型是采用零点补偿式，无需罗盘定磁系方位；读数数字化，直读磁场值。CR_2-69 型则是利用重力矩与磁力矩的平衡原理，以光系标尺上的读格，反映 Z 的相对变化值。这些仪器在我国 20 世纪 60、70 年代的磁法勘探工作中，发挥了重要的作用。

第三节 质子磁力仪

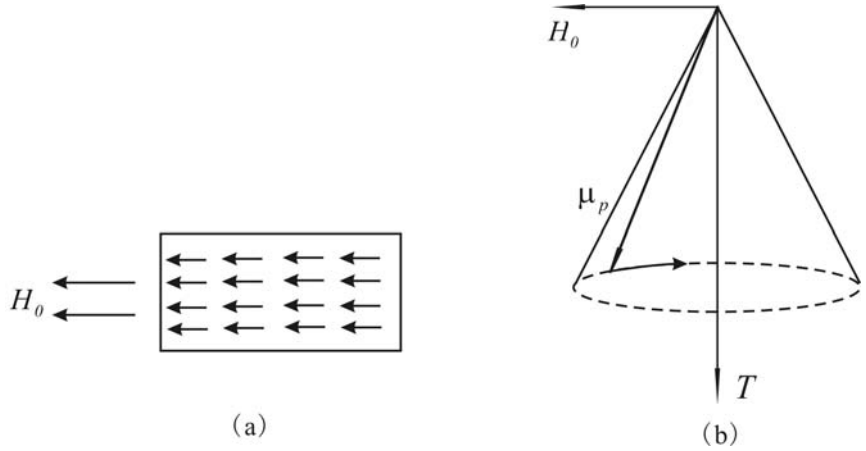
质子磁力仪于 20 世纪 50 年代中期问世，在航空、海洋及地面等领域均得到了应用。它具有灵敏度、准确度高的特点，可测量地磁场总强度 T 的绝对值（或相对值）、梯度值。

一、 质子旋进及测量原理

（一）质子（核子）的旋进

质子磁力仪使用的工作物质（探头中）有蒸馏水、酒精、煤油、苯等富含氢的液体。水（H_2O）宏观看作是逆磁性物质。但是，其各个组成部分磁性不同。水分子中的氧原子核不具磁性。它的 10 个电子，其自旋磁矩都成对地互相抵消了，而电子的运动轨道又由于水分子间的相互作用被“封固”。当外界磁场作用时，因电磁感应作用，各轨道电子的速度略有改变，因而显示出水的逆磁性。此外，水分子中的氢原子核（质子），由自旋产生的磁矩，将在外加磁场的影响下，逐渐地转到外磁场方向。这就是逆磁性介质中的“核子顺磁性”。

当没有外界磁场作用于含氢液体时，其中质子磁矩无规则地任意指向，不显现宏观磁矩。若垂直地磁场 $\boldsymbol{T}$ 的方向，加一个强人工磁场 $\boldsymbol{H}_0$，则样品中的质子磁矩，将按 $\boldsymbol{H}_0$ 方向排列起来，如图 3-3-1 所示，此过程称为极化。然后，切断磁场 $\boldsymbol{H}_0$，则地磁场对质子有 $\mu_p \times \boldsymbol{T}$ 的力矩作用，试图将质子拉回到地磁场方向，由于质子自旋，因而在力矩作用下，质子磁矩 μ_p 将绕着地磁场 $\boldsymbol{T}$ 的方向作旋进运动（称为拉莫尔旋进），如图 3-3-1 所示。它好像是地面上倾斜旋转着的陀螺，在重力作用下并不立刻倒下，而是绕着铅垂方向作旋进运动。



（a）样品中质子磁矩按外磁场方向排列示意

（b）拉莫尔旋进示意

图 3-3-1 质子旋进示意图

（二）测量原理

理论物理分析研究表明，氢质子旋进的角速度 ω 与磁场 $\boldsymbol{T}$ 的大小成正比，其关系为

$$\omega=\gamma_p \boldsymbol{T} \tag{3-3-1}$$

式中：γ_p 为质子的自旋磁矩与角动量之比，叫做质子磁旋比（或回旋磁化率），它是一个常数。根据我国国家标准局 1982 年颁布的质子磁旋比数值是

$$\gamma_p=(2.675\ 198\ 7\pm 0.000\ 007\ 5)\times 10^8 \mathrm{T^{-1}s^{-1}}$$

又因 $\omega=2\pi f$，则有

$$T=\frac{2\pi}{\gamma_p}\cdot f=23.487\ 4f \tag{3-3-2}$$

式中：$\boldsymbol{T}$ 以纳特（nT）为单位。由式可见，只要能准确测量出质子旋进频率 f，乘以常数，就是地磁场 T 的值。

（三）质子旋进信号

从以上讨论可知，测定地磁场 $\boldsymbol{T}$ 的量值，必须使质子作自由旋进运动，为此要将质子磁矩极化，使之偏离 $\boldsymbol{T}$ 方向的一个角度。

通常采用的极化方法是：在圆柱有机玻璃容器内，装满富含氢的工作物质（如水等），容器置于线圈之中。线圈通以电流，使其内产生的极化（磁化）磁场 $\boldsymbol{H}_0$，其方向沿线圈轴线，大致垂直于地磁场 $\boldsymbol{T}$。切断电流后，极化线圈亦作为接收线圈，并调谐在旋进频率 f 上。质子磁矩的的旋进，将在接收线圈中产生感应电压信号。

在接收线圈内，感应信号的电压为

$$V(t_1)=C\kappa_p H_0 \gamma_p T\sin^2\theta\cdot\sin(\gamma_p T t_1)e^{-\frac{t_1}{T_2'}} \tag{3-3-3}$$

式中：C 为与线圈截面积、匝数及容器的充填因子有关的系数，对于一定的探头装置 C 是一个常数；κ_p 为质子（核子）磁化率；$\boldsymbol{H}_0$ 为极化磁场的强度；θ 为线圈轴线与 $\boldsymbol{T}$ 之夹角；t_1 为切断极化场时刻起算的时间；$1/\boldsymbol{T}_2'$ 为衰减常数。

分析式（3-3-3）可得：

（1）感应信号的幅度与 $\kappa_p \boldsymbol{H}_0$ 成正比。$\kappa_p \boldsymbol{H}_0$ 是在极化磁场作用下质子的磁化强度。为了获得强旋进信号，一方面要选用单位体积内质子数目多的工作物质，另一方面使用大极化电流，

产生强极化磁场，这也就提高了功率消耗。

（2）信号幅度与质子旋进圆频率 $\omega=\gamma_p \boldsymbol{T}$ 成正比。若地磁场弱（$\boldsymbol{T}$ 值小），则旋进圆频率 ω 低，信号幅度也就小。目前，质子磁力仪的测程一般是 20 000～100 000nT，相当于旋进频率由 851.52～4257.60Hz，此频率范围对于地面、海洋及航空磁测来说，一般是足够的。

（3）信号幅度与 $\sin^2\theta$ 有关。线圈轴线与 $\boldsymbol{T}$ 的夹角 θ 在 0～90° 之间变化，其大小会影响旋进信号的振幅，而与旋进频率无关。当 $\theta=\pi/4$，信号幅度只降低到最大幅度的一半，因此对探头定向只要求大致与 $\boldsymbol{T}$ 相垂直。但是，θ 接近于 0°，则是探头的工作盲区。

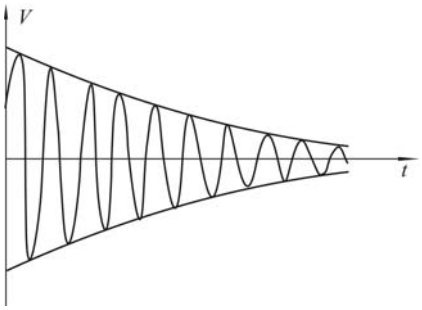


图 3-3-2　质子旋进信号的衰减

（4）旋进信号是按指数函数规律衰减的正弦信号，见图（3-3-2），其频率为 $\omega=\gamma_p \boldsymbol{T}$，衰减常数为 $1/\boldsymbol{T}_2'$，它持续约几秒钟。感应信号的衰减，与探头所处的磁场梯度有关，梯度越大，衰减愈快。可以精确地测定旋进频率（即测定地磁场值），所允许存在的地磁场最大梯度，叫做仪器的梯度容限。

图 3-3-3 是 加拿大产 GSM－19T 质子磁力仪。



图3-6-1 GSM－19T质子磁力仪

二、国产磁力仪的发展现状

目前，国内磁法勘探除了使用国外磁力仪如ENVI（加拿大产）磁力仪、G856（美国产）磁力仪、GSM（加拿大产）磁力仪、Pos1（俄罗斯产）磁力仪、PMG（捷克产）磁力仪外，国产的磁力仪也得到广泛的应用。

1986年，我国地矿和核工业系统分别引进了加拿大的IGS-2/MP-4型和美国的G-856A型的“微机质子磁力仪”，灵敏度为0.1nT，观测精度达到±2.5nT或更高，自动记录数据、自动日变改正、数据可以直接传送到其他计算机系统作进一步处理，同时，地质系统为推广使用MP-4仪器，在方法技术，推断解释等方面作了大量工作，制定了相应的规程，使我国的地面磁法勘探水平在短时间内达到国际先进水平，并得到全面推广。MP-4型仪器逐步国产化，到1993年共生产近300台，少部分仪器被我国计量部门采用当作标准仪器。G-856A经过不断改进，如采用锂电池做电源，一直生产到今天，在各个系统得到广泛应用。

进入21世纪以来，随着国家对地质事业投资力度的加大，以及铁矿和多金属矿产资源的短缺，对质子磁力仪的需求猛增，北京地质仪器厂在MP-4经验的基础上，开发了全新的CZM-3型仪器，2005年投入市场。

核工业系统的京核鑫隆公司在G856A的基础上，不断改进，最近推出了G856F高精度智能质子磁力仪，采用锂电池供电，外形保持了传统的结构。在地震、有色、地质、环保、冶金、石油勘探、煤田、科研等领域广泛使用。

2006年3月重庆奔腾数控技术研究所/重庆万马物探仪器有限公司开发的WCA-1质子磁力仪投产，灵敏度0.1nT。

2006年，廊坊瑞星仪器有限公司推出了灵敏度0.1nT的PM-1A型质子磁力仪，其特点是带有GPS，可外接GPS，存储测点坐标值，信号质量实时监控，信号质量下降可即时发现以便采取措施补救。

三、欧弗豪泽质子磁力仪

自 20 世纪 60 年代中期以来，法国、苏联、加拿大等国相继制成欧弗豪泽质子磁力仪。该仪器的探头一般有两个轴线互相垂直、且垂直地磁场的线圈，绕在盛有工作物质的有机玻璃容器外面，一个是高频线圈，产生射频磁场，频率等于电子顺磁共振频率，约为几十兆赫，另一个是低频接收线圈。在工作物质中，存在着电子自旋磁矩、及质子磁矩两个磁矩系统。在射频场的作用下，电子自旋磁矩极化，由于两种磁矩间的强相互作用，电子顺磁共振或电子的定向排列会导致核子的强烈极化，这种效应称为欧弗豪泽效应。因此质子磁矩沿地磁场方向磁化，可达很大数值，然后在垂直于地磁场方向上加一短促的脉冲磁场，叫做转向磁场，使质子磁矩偏离地磁场方向，质子即绕地磁场作旋进运动，测出旋进频率，即测出地磁场的量值。在欧弗豪泽效应作用之下，可用一个很小的探头即可得到很强的旋进讯号及很高的灵敏度，探头小还可提高梯度容限。由于射频场不间断的作用，因此产生一个不衰减的连续的质子旋进讯号，可以有很高的采样率甚至是连续地测定地磁场。

第四节 光泵磁力仪、磁通门磁力仪与超导磁力仪

一、 光泵磁力仪

20世纪50年代中后期，卡斯特拉提出一种磁场谐振的光泵方法，许多国家开展光泵磁力仪的研究。光泵磁力仪同质子旋进磁力仪一样，它也是属于磁共振类仪器。所不同的是它利用的原理是电子的顺磁共振现象，而质子旋进磁力仪利用的核磁共振。因为这类仪器普遍采用“光泵技术”，所以被称为光泵磁力仪或光吸收磁力仪。

光泵磁力仪所利用的元素是氦、汞、氮、氢以及碱金属铷、铯等，由于采用磁共振元素不同而分为氦磁力仪和碱金属磁力仪；按采用的电路不同可分为自激式磁力仪和跟踪式磁力仪。光泵磁力仪之所以能测量磁场，是基于上述元素在特定条件下，能发生磁共振吸收现象（或叫光泵吸收），而发生这种现象时的电磁场频率与样品所在地的外磁场强度成比例关系。只要能准确测定这个频率，外磁场（地磁场）强度便可算得。这类磁力仪的灵敏度达到0.01nT，国土资源部航空物探遥感中心研制的HC-85跟踪式氦光泵磁力仪的灵敏度优于0.01nT，已成为我国上世纪末的主要航空磁力仪。

（一）光泵磁力仪的物理原理

1、塞曼分裂、能级跃迁。

原子内部轨道电子与原子核之间、电子与电子之间，有着相互作用，以及电子自身的运

动，使得原子具有一定的能量，称为原子的内能总能量。原子的内能是取不连续的能级分布。原子能级的分布，已为原子光谱学的研究实践所证实。

按照量子力学的概念，原子能级依次由主量子数n，角量子数$\boldsymbol{L}$，内量子数$\boldsymbol{J}$（与L及电子自旋量子数$\boldsymbol{S}$有关），以及总角量子数$\boldsymbol{F}$（与$\boldsymbol{J}$及核自旋量子数$\boldsymbol{I}$有关）来决定。

电子的绕核运动、电子自旋、及原子核自旋，使之均具有一定的磁矩，其磁矩的大小与各自的动量矩成比例。则原子磁矩是它们的矢量和。

原子磁矩在磁场的作用下，具有新的能量，此附加能量是量子化的，与其磁量子数m_F有关，m_F取值为0，±1，±2，……±F。因此，原子在外磁场中，由于受到磁场的作用，同一个F值的能级，可分裂成（2F+1）个磁次能级，叫做塞曼分裂。相邻磁次能级之间的能量差与外磁场成正比，这就为测定地磁场$\boldsymbol{T}$提供了可能。

原子中所有电子的能量之和越小，原子越稳定，此时原子的状态，称为基态。当电子从外界得到能量或向外界放出适当的能量时，即从一个能级跃迁到另一个能级，原子能级的变化，称为原子的跃迁。跃迁时两能级之间的能量差应满足玻耳频率条件，即

$$\Delta E_{mn}=E_m-E_n=hf \qquad (3\text{-}4\text{-}1)$$

式中，h为普朗克常数，f为跃迁频率。

当原子受到外界满足玻耳频率条件的电磁波作用，则发生受激跃迁，它既可使原子由低能级跃迁至高能级，也可由高能级跃迁到低能级，在射频范围内（$f\approx10^6$~10^{11}Hz）以受激跃迁为主。当原子未受外界影响，从高能级向低能级的跃迁，称为自发跃迁，在光波范围（$f\approx10^{13}$~10^{15}Hz）内，以自发跃迁为主。

能级跃迁，须遵守跃迁选择定则，即只有满足下述量子数变化条件的能级之间，才发生跃迁。即：

$$\Delta L=\pm1，\Delta J=0，\pm1，\Delta F=\pm1，\Delta m_F=0$$

或

$$\Delta L=\pm1，\Delta J=0，\pm1，\Delta F=0，\pm1，\Delta m_F=\pm1$$

2、光泵作用

在光泵磁力仪中，有的以氦为工作物质。如图3-4-1所示，^{4}He原子的基态是$1s_0$，利用高频放电使其由基态过渡到亚稳态2^3s_1，利用波长λ=1083.075nm（相当于$2^3s_1\rightarrow2^3P_1$的辐射频率）的D_1线右旋圆偏振光照射，使之激发跃迁。但是，2^3s_1中m_J=+1的磁次能级上的原子，因不满足跃迁选择定则，不能吸收D_1线激发到2^3P_1的任何能级上去。而m_J=0，-1磁次能级上的原子，被激发跃迁到2^3P_1（m_J=1，0）的能级上。仅停留10^{-8}秒后又以等几率（按Δm_J=0±1选择定则），跃迁回到2^3s_1的各磁次能级（含m_J=+1）；经过τ_p时间后，则亚稳态2^3s_1中的原子可能全部集中于m_J=+1的磁次能级上。实现了^{4}He原子磁矩在光作用下的定向排列，即光学取向。这种利用光能，将原子的能态泵激到同一个能级上的过程，就叫做光泵作用。

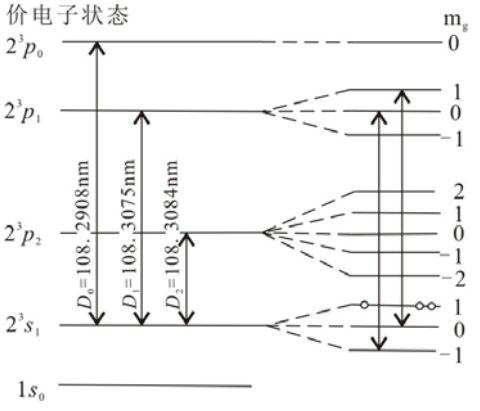


图 3-4-1 ^{4}He（正氦）能级及光学取向示意图

由监控电子在塞曼次能级之间跃迁的拉莫尔频率的方法不同，光泵磁力仪分为跟踪式和自激振荡式两类，下面介绍跟踪式光泵磁力仪。

（二）跟踪式光泵磁力仪测定地磁场 T

跟踪式光泵磁力仪的探头装置示意图如图3-4-2所示，氦灯内充有较高气压的^{4}He，受高频电场激发后，发出波长1083.075nm单色光（D_1线），它透过凸镜、偏振片、及1/4波长片，

形成1.08微米的圆偏振光照射到吸收室。光学系统的光轴应与地磁场（被测磁场）方向一致。吸收室内充有较低气压的^{4}He，经高频电场激发，其^{4}He原子变为亚稳态正氦，并具有磁性。从氦灯射来的圆偏振光与亚稳态正氦作用，产生原子跃迁。对于氦其跃迁频率f与地磁场T有如下关系：

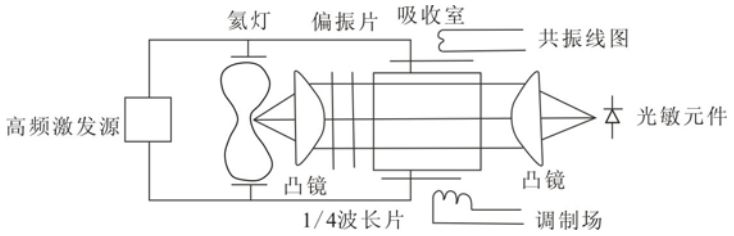


图 3-4-2 跟踪式光泵磁力仪探头装置示意图

$$\left.\begin{aligned} f &= \frac{\gamma_p}{2\pi}T = (28.023\ 56 \pm 0.000\ 3)T \\ \text{或}\quad T &= 0.035\ 684f \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}4\text{-}2)$$

式中，T以nT为单位。这就是说，圆偏振光使吸收室内原子磁矩定向排列，此后由氦灯发出的光，可穿过吸收室，经凸镜聚焦，照射到光敏元件上，形成光电流。

在垂直光轴方向外加射频电磁场（调制场），其频率等于原子跃迁频率f。由于射频磁场与定向排列原子磁矩的相互作用，从而打乱了吸收室内原子磁矩的排列（称磁共振）。这时，由氦灯射来的圆偏振光又会与杂乱排列的原子磁矩作用，不能穿透吸收室，光电流最弱，测定此时的射频f，就可得到地磁场T的值。当地磁场变化时，相应改变射频场的频率，使其保持透过吸收室的光线最弱，也就是使射频场的频率自动跟踪地磁场变化，实现对T量值的连续自动测量。我国生产的HC-85、HC-2000型光泵磁力仪即为此类仪器，HC-2000型灵敏度达0.0025nT，采样率：1-15次/秒，频率响应0~2HZ，磁场工作范围：30000~70000nT，三探头组合可测水平梯度。

GEOMETRICS生产的G-858型铯光泵磁力仪采用自激式，其灵敏度当测速为1秒时达0.01nT，测速为0.1秒，达0.05nT，温漂0.05nT/C°，仪器的可选项可选择同时使用水平及垂直梯度仪，GPS差分和目标分析软件，是一种轻便式高精度磁力仪。



图 3-4-3 G-858 型铯光泵磁力仪照片

二、磁通门磁力仪

磁通门磁力仪又名磁饱和磁力仪，于1933年左右发明，最初用于军事目的的探测，如探潜、探雷。在地球物理勘探工作中，首先用于航空磁测，属第二代航磁仪器。随后，我国曾研制生产CCM-1型、CCM-2及CCM-4型磁通门磁力仪用于地面磁测。

磁通门磁力仪利用高磁导率的坡莫合金，其磁通量密度（磁感应强度）$\boldsymbol{B}$与外磁场$\boldsymbol{H}$之间呈非线性关系，通过产生的电磁感应信号，来测量$\Delta\boldsymbol{T}$或$\Delta\boldsymbol{Z}$。

偶次谐波测量原理 坡莫合金是一种高磁导率、矫顽力小的软磁性材料，它在外磁场作用下，极易达到磁化饱和，如图3-4-5所示。由图可见，外磁场$\boldsymbol{H}$的很小变化，即引起磁感应强度$\boldsymbol{B}$的很大变化，可以说它对磁场的变化起到了“放大”作用，也就是说坡莫合金对外磁场变化很灵敏。

仪器探头装置，如图3-4-6所示。磁芯为闭合磁路，在其两边绕以匝数相同、绕向相反的激励绕组，其外绕以信号绕组。对激励绕组给以交变电压，则有交变磁场作用于磁芯，其磁感应强度$\boldsymbol{B}$达到高度饱和。

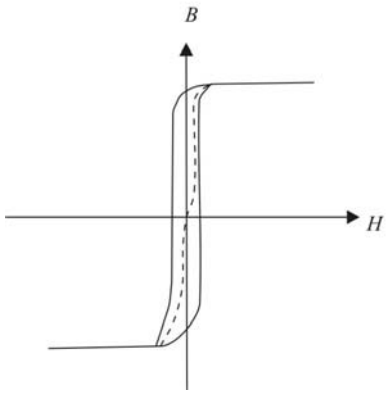
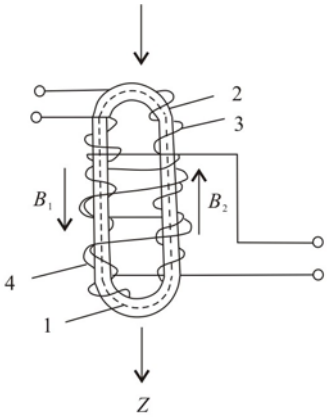


图3-4-5 坡莫合金磁滞回线



1-磁芯；2-磁芯骨架；3-激励线圈；4-信号绕组

图3-4-6 探头结构图

当沿探头轴线方向，没有恒定外磁场作用时，则两边磁芯产生的B_1与B_2，其波形完全对称、相位相差180°，如图3-4-7所示。这时信号绕组接收到整个磁芯的交变磁感应强度$B=B_1+B_2=0$，信号绕组没有感应电压输出。

当沿探头轴线，有恒定外磁场（比如地磁场$\boldsymbol{T}$或$\boldsymbol{Z}$）作用，则磁芯受二个磁场的磁化，其两边磁芯中的磁感应$\boldsymbol{B}$，在正、负半周内饱和程度不一，产生不对称的梯形波$\boldsymbol{B}_1$与$\boldsymbol{B}_2$，如图2.1-10所示，两者相位仍差180°。这时信号绕组接收的总磁通量$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{B}_1+\boldsymbol{B}_2\neq 0$，将有感应电压脉冲输出，其幅度与外磁场的大小成正比，相位与其极性相对应。

根据傅里叶级数分析，或是频谱分析仪器的实际观测得知，一个非正弦周期的脉冲信号，可分解成一系列谐波分量时，其中频率为基波偶倍数的，叫做偶次谐波；频率为奇数倍的，就叫奇次谐波。

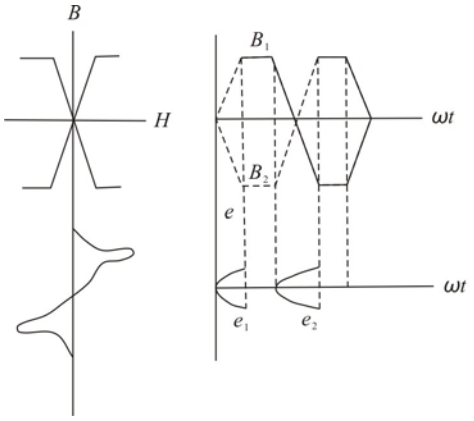


图3-4-7 外磁场为零时B波形图

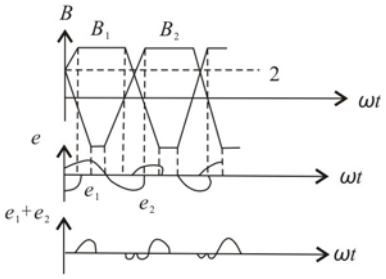


图3-4-8 外磁场不为零时B波形图

由坡莫合金的$\boldsymbol{B}$-$\boldsymbol{H}$曲线，在$|\boldsymbol{H}|\leq\boldsymbol{H}_s$范围内，二者的关系可由下式描述

$$\boldsymbol{B}=\mu_0\boldsymbol{H}(a-b\boldsymbol{H}^2) \tag{3-4-3}$$

式中，a、b是常数，它取决于金属物质达到磁饱和的性质。

当给激励线圈施以磁场$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{Z}+\boldsymbol{H}_m\sin\omega t$，作用于磁芯装置，则接收线圈中产生感应电压的量值，由下式给定

$$e=A\frac{dB}{dt} \tag{3-4-4}$$

式中，$\boldsymbol{A}$是与接收线圈有关的常数。

由（3-4-3）及（3-4-4）二式，可得e由$\cos\omega t$、$\sin 2\omega t$、$\cos 3\omega t$表达的关系式，说明输出

电压中包含了一次谐波（基波）、二次谐波、及三次谐波。且二次谐波项的系数中包含了$\boldsymbol{Z}$，故只有外磁场$\boldsymbol{Z}\neq0$时，才有二次谐波出现，其振幅正比于外磁场$\boldsymbol{Z}$的大小。

采用对称的磁芯装置，及线路设计，滤除一次谐波及三次谐波，在输出电压中保留二次谐波，通过测量其振幅来测定地磁场。

我国曾生产和使用CCK-1型航空磁通门磁力仪，及CCM-2型地面磁通门磁力仪。前者测量$\Delta\boldsymbol{T}$，后者测量$\Delta\boldsymbol{Z}$。它们均是利用偶次谐波的工作原理，在20世纪50-60年代航磁工作中使用过，后因仪器的灵敏度不太高，被核子旋进、光泵航空磁力仪所代替。地面磁通门磁力仪由于测量$\Delta\boldsymbol{Z}$以及梯度，使用方便等特点，较多的用于铁矿勘察与地下或水中铁质埋藏物的探测。我国近期研制的CCM-4型磁通门磁力仪分辨率达1nT，量程±19999nT，工作环境温度；-10℃~+50℃，数据液晶显示，仪器轻便性能稳定。同时开发研制成的CCT-2型智能化磁通门磁力梯度仪，分辨率0.1nT/字，温度系数≤0.5nT/C°，稳定性：在常温下4小时平均漂移小于1nT/h。用1926点阵液晶模块显示，可实时显示实测曲线，并与计算机联机后实现数据自动化处理。

三、超导磁力仪

超导磁力仪是 20 世纪 60 年代中期利用超导技术研制成的一种高灵敏磁力仪，又称为超导量子干涉仪（Superconducting Quantum Interference Device，SQUID)。其灵敏度高出其他磁力仪几个数量级，可达 10^{-5}~10^{-6}nT，能测出 10^{-3}nT 级磁场。它测程范围宽，磁场频率响应高，观测数据稳定可靠。

在应用地球物理方面，可制成航空磁力梯度仪、SQUID 磁力梯度张量测量系统；在地磁学中可用于研究地磁场的微扰；在磁大地电流法中可用于测量微弱的磁场变化；它还可用于岩石磁学研究。由于这种仪器的探头需要低温条件，常用装于杜瓦瓶的液态氦进行冷却，因此装备复杂，费用较高。但是，随着超导技术研究的不断进展，相信在不久的将来，在地球物理学中应用会多起来。

超导磁力仪的基本原理如下：某些金属如锡、铅、锌、铌、钽和一些合金，当它们的温度降到绝对零度附近某一温度以下时，其电阻突然降为零值。这种在低温条件下，电阻突然消失的特性，称为超导电性，具有这种性质的物质叫超导体。电阻为零时的温度，称临界温度 T_c，如锡（3.7K）、铅（7.2K）、铌（9.2K）。

1962 年约瑟夫逊提出并经实验证实，在两块超导体中间夹着的绝缘层，超导电子能无阻挡地通过，绝缘层二端无电压降，此绝缘层叫超导隧道结（约瑟夫逊结），这种现象叫做超导隧道结的约瑟夫逊效应。

超导磁力仪是利用约瑟夫逊效应测量磁场，其测量器件是由超导材料制成的闭合环，在一个或两个超导隧道结。超导隧道结的截面积很小，只要通过较小的电流（10^{-4}～10^{-6}A），接点处就达到临界电流 I_c（超过 I_c 超导性被破坏，即超导隧道结所能承受的最大超导电流）。I_c 对磁场很敏感，它随外磁场的大小呈周期性起伏，其幅值逐渐衰减。临界电流 I_c，也是透入超导隧道结的磁能量 Φ 的周期函数。它利用器件对外磁场的周期性响应，对磁能量变化（与外磁场变化成正比）进行计数，已知环的面积，就可算得磁场值。



图 3-4-9 2G-755 型立式超导磁力仪(美国)

第五节 测量岩（矿）石物性的仪器

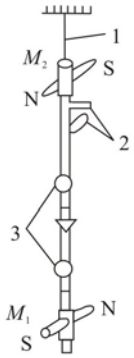
磁力勘探一般可采用磁秤、质子磁力仪等测定岩石磁参数。但对于弱磁性的岩石需采用无定向磁力仪或旋转磁力仪等专门设计的仪器进行测定。

一、无定向磁力仪

我国曾生产一批WSW-1型无定向磁力仪，它主要用于古地磁标本测量。其核心部分磁系如图3-5-1所示。

无定向磁力仪一般由磁系、光泵、扭头、筒子、开关、标本架和底座等部分组成。标本架位于下部磁棒附近，其升降可用多头螺丝控制，可使待测标本的中心，快而准地同下部磁棒处于同一水平面内。标本到磁棒中心的距离可由标本架前的刻度尺读出。

磁系放置于圆柱形磁屏蔽筒内，两个磁矩相等、极性相反的磁棒M_1与M_2，其间距离150mm，固定在一根长约170mm的轻质铝杆上，用扭力系数近于零的悬丝，将铝杆吊起，如图3-5-2所示。由于磁系的总磁矩为零，因而它不受均匀磁场的影响，若悬丝的扭力系数为零，则磁系可静止在任意方位上，故称为“无定向磁系”。磁系对不均匀磁场却很灵敏。



1-悬丝；2-校正磁铁；3-磁系反光镜

图3-5-1 无定向磁系图

若在磁系下部磁棒所在平面的中垂线上放置岩石标本，地磁场水平分量$\boldsymbol{H}$对磁系不起作用，此时受标本弱磁场h作用，如图3-5-2所示，其平衡方程式为

$$h\boldsymbol{M}_1\cos\theta=\tau\theta \qquad (3\text{-}5\text{-}1)$$

式中，h是标本的磁场。一般偏转角θ很小，由（3-5-1）式有

$$\frac{\partial\theta}{\partial h}=\frac{M_1}{\tau} \qquad (3\text{-}5\text{-}2)$$

无定向磁系下部磁棒其磁矩M_1一般较大，悬丝扭力系数τ非常小，所以其灵敏度很高，且τ愈小，灵敏度愈高。

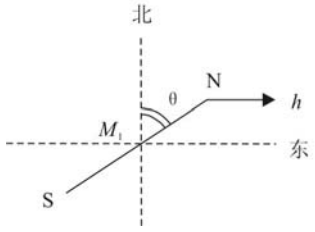


图 3-5-2 无定向磁系受标本磁场作用

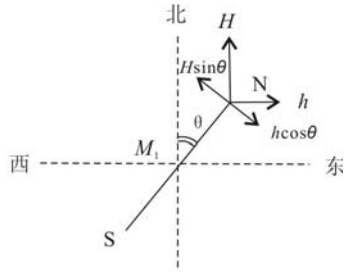


图 3-5-3 单磁棒受磁场作用

若是单磁棒，如图3-5-3所示，则它既受标本磁场h的作用，亦受地磁场$\boldsymbol{H}$的作用，其力矩平衡方程式为

$$\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{M}_1\cos\theta=\boldsymbol{H}\boldsymbol{M}_1\sin\theta+\tau\theta \qquad (3\text{-}5\text{-}3)$$

此式分别对θ与h微分，并考虑偏转角θ很小，即$\cos\theta\approx1$，$\sin\theta\approx0$，则有

$$\frac{\partial\theta}{\partial h}=\frac{M_1}{HM_1+\tau} \qquad (3\text{-}5\text{-}4)$$

对比（3-5-2）与（3-5-4）两式可见，无定向磁系灵敏度要比单磁棒的灵敏度高得多。

二. 旋转磁力仪

旋转磁力仪是应用于岩石磁学和古地磁学中测定岩石磁性参数的高灵敏度仪器。

旋转磁力仪是根据电磁感应原理设计的。该仪器是将弱磁性标本放在由一对线圈组成的传感器里，以一恒定的角速度旋转标本，则传感器线圈中将产生感应交变电压。而电压的振幅取决于和旋转轴相垂直的磁化强度分量和旋转度。旋转磁力仪的原理框图如图3-5-4所示。

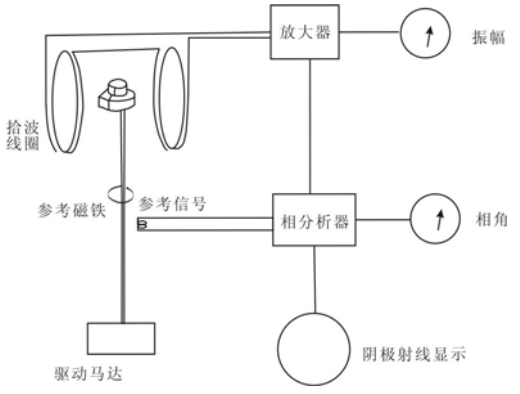


图 3-5-4 旋转磁力仪原理框图

旋转磁力仪一般由传感装置、测试装置和电源三部分组成：

1. 传感装置 ①驱动系统：由两个坡莫合金罩所屏蔽的直流马达驱动，并受一个晶体振荡器所控制，使其转速稳定。②旋转系统：旋转系统的轴镶在本系统的盒内，由两个轴承所支撑。样品支架卡在旋转轴上。③传感线圈：传感线圈的绕组是一个截面为正方形的环匝并灌入环氧树脂而成型的。当处于工作状态时，传感器就成了一个与赫姆霍兹线圈相似的系统。为了便于在支架上装卸样品，线圈可以倾斜。为了消除伪磁场的效应，用三层坡莫合金罩把传感器屏蔽。④支撑和弹簧系统：为了把机械振动对传感器的影响减小到最低限度，仪器设置了支撑和弹簧装置。

2. 测试装置 传感线圈产生的讯号经前置放大后，通过屏蔽后送入测试装置。这个讯号在这里经过具有可调增益性能的缓冲放大器到达具有几个档的量程选择器。讯号经位相屏蔽后再经放大送入同步的两个滤波器和两个检波器。然后由数字电压表测读。

3. 电源：包括一个带有平滑稳定装置的转换滤波器。

三．磁化率仪

磁化率仪是用于野外实时测量岩石露头与标本磁化率的仪器。

SM-30磁化率仪体积只有手掌大小,但精度高，可达到10^{-7}SI，适用在野外地质勘探和快速实验室分析，对岩石或岩心样品进行分析和分类。能测出顺磁性、反磁性、铁磁性岩石的细微差别并较精确地给出磁化率。

该仪器包含一个振荡器和一个检波线圈，振荡器的频率取决于仪器到岩石的距离，频率的变化与岩石磁化率的量值成比例。通过两次振荡频率的测量来获得频率的变化。第一次测量在岩石附近完成，称为“检波阶段”。第二次测量远离岩石（自由空间测量），该步骤被称为“补偿阶段”。

第二次测完后，两次的结果自动相减并显示出来。图3-5-5是捷克产SM-30磁化率仪。



图3-5-5 SM-30磁化率仪(捷克)

习　　题

1. 磁力仪的格值和灵敏度有何不同？
2. 当悬丝式磁力仪磁系的磁棒*S*极向下偏θ角时，画图并写出磁系平衡方程。
3. 质子旋进式磁力仪测量外磁场的基本原理。
4. 质子磁力仪、光泵磁力仪、磁通门磁力仪，测量外场原理的异同点。
5. 什么叫无定向磁系？

发展趋势与本章参考文献

磁场是具有方向和幅值的矢量场。在磁法勘探早期，人们就意识到磁场的矢量信息和空间导数对局部地质构造的重要性。随着新物理原理的应用与仪器制造水平的提高，磁法勘探也由单分量测量向梯度测量、矢量测量，以及张量测量方向发展。

利用微观世界中与磁场有关的现象(这些现象要用量子理论解释)来测量磁场的仪器,都可称为量子磁力仪,从这个意义上说,核子旋进磁力仪(质子磁力仪)、欧弗豪泽效应磁力仪(Overhauser effect Magnetometer,OVM)、氦 3 磁力仪、光泵磁力仪(钾、铷、铯、氦 4)、超导磁力仪(超导量子干涉磁力仪 Superconducting Quantum Interference Device, SQUID),都是量子磁力仪。不过在习惯上,人们把核子旋进磁力仪(包括欧弗豪泽效应磁力仪、氦 3 磁力仪)和光泵磁力仪称为量子磁力仪。这两类磁力仪都是利用亚原子粒子(质子、电子)的自旋。在上述磁力仪中,在 4° K 条件下工作的 SQUID,灵敏度最高,达到 1fT/$Hz^{1/2}$(1fT=10^{-15}T,fT 飞特),而且

测程大,能够响应快速变化的磁场,就是说频带很宽(0~n×10^6Hz)。因此,在某些领域(例如,在生物磁学方面),其它类型的磁力仪目前还无法取代它。但需要低温条件使它的应用受到限制。

目前美国和俄罗斯等国科学家正在积极研究和开发另一种量子磁力仪———原子磁力仪。原子磁力仪和光泵磁力仪一样,也是利用某种气态碱金属(例如钾)原子中电子的自旋,它涉及的检测方法和光泵磁力仪有些不同,更复杂一些。和美籍华裔物理学家朱棣文(Steven Chu)共同获得 1997 年诺贝尔物理学奖的法国物理学家科恩-唐努吉(Claude Cohen-Tannoudji)早在 20 世纪 60 年代末就研究过原子磁力仪,他指出,原子磁力仪依据的原理,是测量其电子自旋已被极化的原子在磁场中的进动(旋进)。最近由美国普林斯顿大学物理系 M.V.Romalis 教授和位于西雅图的华盛顿大学物理系的 J.C.Allred 等研制成的一种新型原子磁力仪,完全利用光学方法测量磁场,灵敏度达到 0.54fT/Hz1/2(1fT=10^{-15}T,fT,飞特),经过改进后还可提高到10^{-2}~10^{-3}fT/Hz1/2,空间分辨率达到毫米级。在弱磁场中工作时,这种磁力仪的灵敏度可能达到10^{-18}T(10^{-18}T= 1aT, aT,阿特)的数量级,那将比 SQUID 灵敏 1000 倍。这种磁力仪不需要低温条件。

下面介绍几种分量、梯度与张量的仪器：

1、地面三分量磁力仪

用于地磁台站或固定场所(如船坞、实验室)高稳定性三分量磁力仪和多通道(总通道数可达数百道) 的磁通门探测系统已经广泛应用。如BD10-15台站型三分量磁通门磁力仪（图3-6-2 ），适用于地磁台长期观测地磁场变化。主要特点是，传感器和补偿线圈结构稳定，受温度影响小，分辨率为0.1nT。



图3-6-2 BD10-15台站型三分量磁通门磁力仪

FVM - 400三轴磁通门磁力仪可用于地面三分量磁测，它能在选用直角坐标模式下显示磁场的大小，磁倾角和磁偏角三个参数，且不需要再进行手工的计算，使用便捷，效率较高，不过精度较低，为1nT。



图3-6-3 FVM-400三轴磁通门磁力仪(美国)

2、磁力梯度仪

磁力梯度测量有两种方式，一种是水平梯度测量，一种是垂直梯度测量。均是用两个探头以一定的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。

Grad601 是一款垂直分量的磁通门磁力仪，由一只或两只状探头组成，每一个探头包含两个垂直相隔 1 米的磁通门磁力计。Grad601 用于管线、电缆、废弃垃圾桶和考古点等定位应用。



图 3-6-7 Grad601 梯度磁力仪

3、SQUID(超导量子干涉仪，Superconducting Quantum Interference Device，SQUID)磁力梯度张量测量系统

上世纪九十年代末以来，美国，德国，澳大利亚等国研制成功用于测量磁力梯度张量仪器。主要有磁通门磁力仪和超导磁力仪，后者又分为高温(77°k，液氮冷却)和低温(4°k，液氦冷却)两种。德国 1997 年开始研究和开发航空全张量磁力梯度仪，利用液氦冷却的薄膜技术制成低温超导量子干涉仪。于 2004 年在南非用直升飞机和固定翼飞机进行了全张量磁力梯度仪系统的飞行试验，测得了约 100km（线距 100m)的梯度张量数据。

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．长春地质学院磁法教研室：磁法勘探，地质出版社，1979

6．董焕成 磁法勘探教程，地质出版社，1993

7．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

8．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.

9．吴招才, 刘天佑. 磁力梯度张量测量及应用. 地质科技情报. 2008. 27(3):107-110

10．Stolz R, Chwala A, Zakosarenko V, et al. SQUID technology for geophysical exploration. in 76th SEG Technical Program Expanded Abstracts.2006:894~898

11．Stolz R, Zakosarenko V, Schulz M,et al. Magnetic full-tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications. The Leading Edge. 2006,25(2):178~180