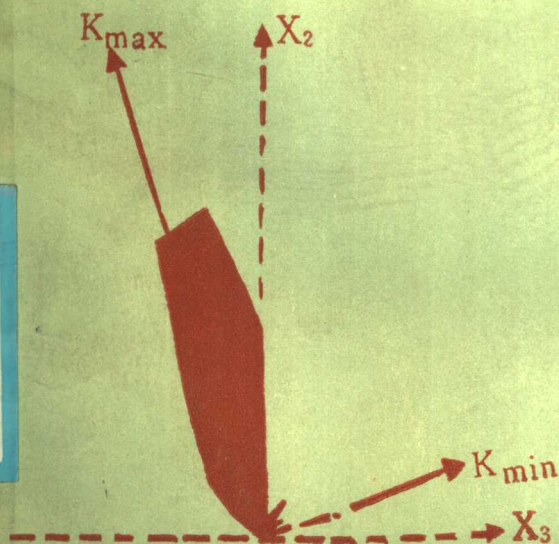


岩石磁化率各向异性

● 贺绍英 ● 孙世伟 ● 杨嗣元 ● 李岩 编著



地质出版社

岩石磁化率各向异性

贺绍英 孙世伟 编 著
杨闢元 李 岩

地 质 出 版 社

岩石磁化率各向异性

贺绍英 孙世伟 编著

杨嗣元 李 岩

责任编辑：曹 玉

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经营

*

开本：850×1168¹/₃₂印张：3³/₁₆字数：80,000

1986年2月北京第一版·1986年2月北京第一次印刷

印数：1—1,565定价：0.95 元

统一书号：13038·新211

前 言

在三大岩类中，变质岩具有显著的各向异性特点。地质矿产部地质研究所变质岩组和地球物理、地球化学勘查研究所物性组合作，结合前寒武纪地质工作，进行了岩石磁化率各向异性的研究。

在我国，这方面的工作刚开始，有不少问题尚待解决。这项工作的开展对其它岩类、对构造地质和矿床勘探的研究以及古地磁的工作，都有实用意义和参考价值。因此编写了这本小册子，希望通过它来介绍磁化率各向异性的基本概念及其性质，一般的测试方法和应用，为读者进一步应用这个参量提供基础资料。

第一章由杨闾元执笔，第二章与第四章由贺绍英执笔，第三章由孙世伟与李岩执笔。附录为有关的数学知识，是郑百哲的讲课内容，由贺绍英整理。由于作者水平所限，经验不足，难免有错误或不当之处，深望读者指正。

地质研究所沈其韩研究员、北京轻工业学院郑百哲副教授审阅了本稿，提出了许多宝贵的修改意见。地质所张荫芳对书中列举的天然岩样进行了补充鉴定，宋迎年清绘了书中的插图。本书所用的天然岩样皆取自冀东，其中部分标本是由地质所刘国惠、张勤文、高吉凤、伍家善提供的。有关磁性数据在物探所北京西峰寺古地磁实验室测定。在工作过程中还得到许多同志的帮助，谨此一并表示深切的谢意。

引 言

岩石内的矿物颗粒或矿物的晶格在空间分布、相对配置上所表现出来的某种方向性,也应在相关的物理性质上有所反映,磁化率就是其中之一。岩石磁化率各向异性的现象在二十年代已有人研究,但主要是在五十年代以后,才成为国际上一些地球物理与地质学家着意开拓的领域。这首先要归功于Graham J.W.,他在1953年提出岩石磁化率各向异性是岩石组构的要素之一,有可能在解决构造作用、岩石生成等地质问题上发挥作用;而且,测量岩石磁化率各向异性的速度要比常规的岩组测量快得多,所以他提示人们要积极地开拓这个领域。

岩石的磁化率各向异性是岩石的基本物理性质之一,包含着丰富的地质信息,在我们的地球物理与地质工作中应该测定并研究它。例如,岩石的磁化率各向异性使岩石在地磁场中所获得的磁化矢量偏离当时的地磁场的方向,在古地磁工作中需要予以考虑;沉积变质铁矿在平行“层面”与垂直“层面”方向上的磁化率可以相差2—3倍以上,在进行有关磁异常的定量解释时,就需要予以考虑,……。岩石的磁化率各向异性作为岩石的磁性组构就更预示了它在解决地质问题上的可能潜力,近一、二十年来,国际上有人研究了它在反映沉积岩的沉积层面、沉积环境,变质岩与火成岩的叶理、流线,岩石的应变与构造作用等方面的效用。

岩石的磁性基本上是铁磁性的,它的磁化率还是外加磁场强度的函数,只是在弱磁场中,岩石的磁化才可看成为线性的,这时,岩石的磁化率在数学上是一个三维二阶实对称的张量,它是具有三个主磁化率的不变量,在这样的条件下来研究它,问题就会简单一些。实际岩石是处在地球磁场这个弱磁场中,所以本书叙述的是在弱磁场中岩石磁化率各向异性。

书中用到几个物理量的代表符号为:

K_0 ——固有磁化率张量

K ——视在磁化率张量

κ_H ——沿外加磁场 $\vec{H}$ 方向的方向磁化率

$\vec{H}_e$ ——有效磁场矢量

$\vec{H}$ ——外加磁场矢量

$\vec{J}$ ——总磁化强度矢量; 在不涉及剩余磁性的章节中, $\vec{J}$ 代表感应磁化强度矢量

$\vec{J}_i$ ——感应磁化强度矢量

$\vec{J}_r$ ——剩余磁化强度矢量

$\vec{M}$ ——磁矩矢量

$\vec{B}$ ——磁感应强度矢量

μ ——导磁率张量

N ——退磁系数张量

l_i ——某矢量相对 i 轴的方向余弦

I ——倾角

D ——偏角

磁化率的单位:

$$1 \text{ 国际单位 (SI)} = \frac{1}{4\pi} \text{ 电磁单位 (emu 或 CGSM)}$$

$$1 \text{ emu (或 CGSM)} = 4\pi \text{ SI}$$

目 录

前言

引言

第一章 岩石的感应磁化.....(1)

磁化率及在弱磁场中的磁化, 岩石与岩石样品的磁化率各向异性与视在磁化率

第二章 磁化率各向异性的数学表象.....(9)

磁化率张量, 方向磁化率, 磁化率各向异性椭球, 主磁化率值与主方向的计算, 常用的数量及赤平投影图等表示方法

第三章 测定磁化率各向异性的方法.....(33)

感应测量方法——KLY-1型卡帕桥测量原理, 静态测量方法——WSW-1型无定向磁力仪测量原理, 磁化率张量与剩余磁化强度矢量的测量方法

第四章 岩石的磁性组构.....(57)

易磁化方向, 磁化率量值椭球的形状, 各向异性度, 与岩石组构的关系

附录 有关的数学知识.....(76)

指标符号, 克罗内克符号与排列符号, 笛卡尔张量, 对于线性方程的最小二乘法, 有关的坐标系变换

参考文献.....(96)

第一章 岩石的感应磁化

物质在磁场的作用下发生感应磁化，感应磁化强度的大小与方向由同物质的磁化率决定，在一定的外场条件下，磁化率是物质的固有特性。在物质内的一点上，感应磁化强度矢量 $\vec{J}$ 与有效磁场矢量 $\vec{H}_e$ 之间有以下关系

$$\vec{J} = \mathbf{K}_0 \vec{H}_e$$

$\mathbf{K}_0$ 是物质(在该点的)固有磁化率，是个张量，是有效磁场的多值函数。

物体在磁化的初始状态(即 H_e 和 J 均为零时)， H_e 由0增加时， J 沿图1.1中的虚线变化，直至 J 达到饱和点B，这一段曲线称为初

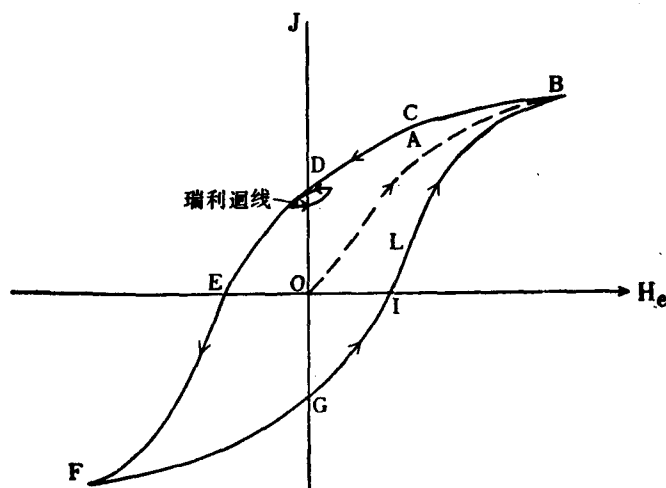


图 1.1 磁滞回线

H_e —有效磁化场； J —感应磁化强度；OD, OG—剩余磁化强度，
OE, OI—矫顽磁力

始磁化曲线。以后，当 H_e 减小到零时， J 并不沿虚线下降，而是

沿实线经C至D, J的OD值称为剩磁。H.转向负磁场后, J到达零时的H.值(OE), 称为矫顽场。以后, 随着H.在负向增大, J一直到达负向饱和点F, H.如再次向正向增大, 则J值将沿GIL回到B点, 同样, OG为剩磁, OI为矫顽场。再次降低H., 将重复上述过程, 表征这一过程的回线称磁滞回线。

从图1.1可以看出, 在磁滞回线及初始磁化曲线上各点的磁化率是不同的。所以, 随着测试条件的不同有不同的磁化率定义。

初始磁化率: 表征物质在初始状态时(即O点附近), J随H.的变化率

$$K_I = \left. \frac{dJ}{dH.} \right|_{H. \rightarrow 0}$$

微分磁化率: 在初始磁化曲线上, 增加一个极小的磁化磁场增量 $\Delta H.$, 相应J变化为 ΔJ , 二者的比值即微分磁化率

$$K_D = \left. \frac{\Delta J}{\Delta H.} \right|_{H. + \Delta H.}$$

可逆磁化率: 在初始磁化曲线上, 或磁滞回线上减少(有的文献未把减少作为条件提出)一个磁场增量 $\Delta H.$, J相应变化 ΔJ , 得到的磁化率

$$K_R = \left. \frac{\Delta J}{\Delta H.} \right|_{H. - \Delta H.}$$

不可逆磁化率: 微分磁化率与可逆磁化率的代数差, 称不可逆磁化率。

总磁化率: 在初始磁化曲线上J和H.的比值称总磁化率,

$$K_T = \left. \frac{J}{H.} \right|_{H.}$$

对于地球物理工作来说, 一般最有意义的磁化率, 是在天然地磁场下测得的磁化率, 也就是D或G点附近的磁化率, 即本文设的弱磁场条件(约100000nT以内)。

被测物体是置于弱磁场中测量其磁化率(弱磁场可以是地磁

场或交变磁场，也可以转动标本改变场的相对方向），在此情况下可以用瑞利回线（图1.2）来描述。在 E' 点增加 H_e 值时，磁化沿瑞利回线的下部 $E'A$ 至 E'' ，再减小时，磁化沿上部 $E''A'E'$ 返回，它的可逆磁化率一般可以 $E'E''$ 连线的斜率来表示，在弱磁场条件下，在 D 点附近，瑞利回线的轨迹基本上和 $D'DD''$ 吻合。因此，我们测试到的磁化率即 $D'DD''$ 的斜率。

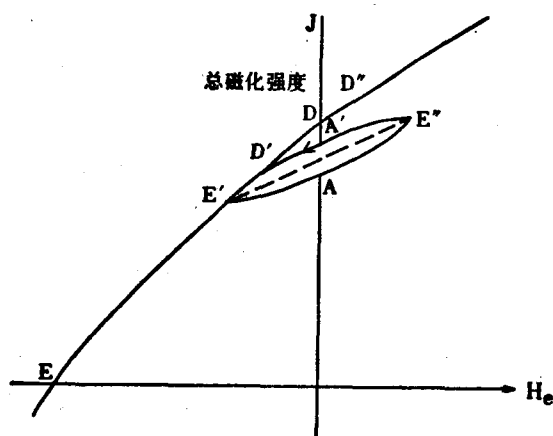


图 1.2 在弱磁场中的磁化， $E'A'E''A'E'$ -瑞利回线

我们通过测量岩石样品从而了解岩石的磁化率各向异性。当样品在不同方向上显示出不同的磁化率时，其内在的因素是很多的，主要可归纳为以下几种：

1. 样品相对于测试系统来说，其磁性物质的分布可觉察到不均匀性，例如样品的某一角磁化率很高，而测试距离又不合理地近，则可产生不同方向上磁化率的视在差异。
2. 样品的剩余磁性显著地大于感应磁性时，由于测量的误差，也能显示为不同方向上的磁化率视在差异。
3. 样品的形状使各方向的退磁系数不同，即退磁系数的各向异性，导致磁化率在不同方向上的视在差异。
4. 样品中磁性矿物颗粒的形状为非等轴状，以致产生矿物颗

粒的磁化率各向异性，这些颗粒在空间的排列分布又不能认为是随机的，因此使它的总体，即样品本身，在不同方向上显示出磁化率的视在差异。

5.组成样品的磁性矿物本身存在着晶体的磁各向异性，其晶格在空间的排列分布又不能认为是随机的，因此使它的总体，即样品本身在不同方向上显示出磁化率的视在差异。

前1, 2, 3的因素，属于测量有限外形的样品中的问题，我们把它当作需要消除的干扰来对待；后两种是由岩石的固有属性引起。因此，本书介绍的是后二者，即磁性矿物颗粒的形状与磁性矿物结晶的各向异性所构成的岩石磁化率各向异性。

引起岩石磁化率各向异性的因素主要有二个：其一是磁性矿物颗粒的形状因素，其二是磁性矿物的磁晶各向异性。

形状因素引起的磁化率各向异性是决定于矿物颗粒的形状产生的退磁系数与矿物颗粒在空间的排列分布情况。后面将谈到由退磁系数引起的视在磁化率变化是有限的，因此由形状因素引起的磁化率各向异性，对于固有磁化率较低的磁性矿物是不大的。但是，形状因素对含有固有磁化率大的磁铁矿物的岩石的磁化率各向异性来说是主要因素。

磁晶各向异性是由于矿物的固有性质所产生的各向异性。由于原子具有原子磁矩，既有无磁矩之间的相互耦合，还有无磁矩与点阵间的耦合，所以原子间的距离和原子排列的特定方向，使得晶体在沿其某一个方向上，比起沿其它方向言，成为对于磁化来说需要最小能量的方向，它即是易磁化方向，形成了磁晶的各向异性。沿不同结晶轴向，它们的磁化率是不同的，即磁化的难易不同。

单个矿物晶体的磁化率各向异性有的是很大的，其最大磁化率与最小磁化率比值有的可达 10^2 以上，远大于形状因素引起的各向异性度。

但是实际上，岩石或矿石是由许多矿物组成的集合体，它们的磁化率各向异性要取决于其中所有磁性矿物的磁性及它们在空

间中排列分布情况的综合结果。一般在无规则的（随机的）分布状态下，由它们的总磁化矢量所得到的磁化率各向异性就显得比较小。

对于各向同性的物质，我们可以用

$$J = K_0 H_0$$

来表示，其中 κ_0 为固有磁化率，是个标量；而对于各向异性的物质，磁化率就要用张量的形式来描述，即

$$\vec{J} = K_0 \cdot \vec{H}_0$$

在弱磁场条件下可以认为感应磁化强度相对有效磁场强度的变化是线性的， K_0 是二阶张量。在笛卡尔坐标系（x、y、z坐标轴）中，可表示为

$$J_x = K_{xx}(H_0)_x + K_{xy}(H_0)_y + K_{xz}(H_0)_z$$

$$J_y = K_{yx}(H_0)_x + K_{yy}(H_0)_y + K_{yz}(H_0)_z$$

$$J_z = K_{zx}(H_0)_x + K_{zy}(H_0)_y + K_{zz}(H_0)_z$$

K_0 有9个分量，它的矩阵表达式为：

$$[K_0] = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

由于能量守恒定律，9个分量中的6个交叉项有以下关系

$$K_{xy} = K_{yx}, K_{xz} = K_{zx}, K_{yz} = K_{zy}$$

可以并为三项，因此实际上磁化率张量只有6个独立分量，是一个对称张量。

从笛卡尔二阶张量的性质来看，当我们转动坐标系时，就有可能获得交叉项均为零的张量形式，即

$$[K_0] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix}$$

这时坐标系的各轴与磁化率各向异性椭球三轴的方向一致。从物理意义来看，即沿x轴方向来观测它好像具有 K_{xx} 的均匀磁化率介质一样，而沿y、z轴方向又好像具有 K_{yy} 、 K_{zz} 的均匀磁化率介质

一样。但只要偏离这个方向去观察，交叉项即有值，不是零，就不能看成是均匀磁化率的介质了。当

$$K_{xx} = K_{yy} = K_{zz} = K_0$$

这时，磁化率各向异性椭球成为圆球，也就是说它实际上就是各向同性的磁化率介质。

实际工作中是通过外磁场测定岩石样品的磁化率，从而来确定岩石的固有磁化率的。通过外磁场测得的磁化率称为视在磁化率，以 K 表示，

$$\vec{J} = K \cdot \vec{H}$$

其中 $\vec{H}$ 为外磁场矢量

但是，对于外磁场测试来说，样品的边界形态就直接会影响 K 。也就是说，对于 K_0 为各向同性的标本，由于形体的原因，可以测试成 K 为各向异性的（只有在等轴体时 K 也为各向同性），对于 K_0 为各向异性的，一般有 K 的各向异性。

对于有限体的集合来说，内场与外场是相对的，因此岩石的固有磁化率 K_0 也取决于该岩石内在磁性颗粒的固有磁化率及其形状和组构。

由形状产生的影响，可以以退磁系数来表示。样品在外磁场 H 中，将产生一个退磁场 H_d ，它正比于磁化强度值 J ，即

$$H_d = NJ$$

其中 N 即退磁系数。

对于固有磁化率为各向同性的样品，其内场即有效磁化场

$$H_e = H - H_d = H - NJ$$

由于

$$J = K_0 H_e = K_0 (H - NJ)$$

所以

$$J = \left(\frac{K_0}{1 + NK_0} \right) H$$

即

$$K = \frac{J}{H} = \frac{K_0}{1 + NK_0}$$

$$K_0 = \frac{K}{1 - NK}, \quad N = \frac{K_0 - K}{K_0}$$

可以看出, 由于 N 恒等于正值, 所以 K_0 恒大于 K , 当 K_0 趋于无穷大时, K 的极限值为 $\frac{1}{N}$ 。在 N 趋于零时, K 趋于 K_0 , 即在退磁系数为零时, 所测到的视在磁化率 κ 即是固有磁化率。

表 1 给出了椭球体, 圆柱体和方棱柱体的退磁系数。

表 1

尺寸比 $\frac{a}{b}$	椭 球 体	圆 柱 体	方 棱 柱 体
0.01	2.9535	2.895	2.898
0.1	2.5824	2.3901	2.4153
0.2	2.2515	2.0406	2.0826
0.4	1.7646	1.5843	1.6446
0.8	1.1832	1.0857	1.1529
1.	0.9999	0.9348	0.9999
2.	0.5208	0.5457	0.5949
3.	0.3261	0.3834	0.4212
4.	0.2262	0.2952	0.3255
6.	0.1296	0.2019	0.2235
8.	0.0852	0.1533	0.1701
10.	0.0609	0.1236	0.1371
100.	0.00129	0.01269	0.01416

表 1 中的数值是以球体的退磁系数为单位, 即 $\frac{4\pi}{3}$, “尺寸比”

对椭球, $\frac{a}{b} < 1$ 为扁球, $\frac{a}{b} > 1$ 为长球, $\frac{a}{b} = 1$ 为圆球; 对圆柱体, a 为高度, b 为直径; 对方棱柱体, a 为高度, b 为宽度, 所以 $\frac{a}{b} = 1$ 时为正方体。

但是实际上退磁系数也是一个张量 N , 各向同性只是它的特

例。可以证明当 $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{N}$ 均为各向异性时，视在磁化率张量的表达式为

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{K}_0}{\mathbf{I} + \mathbf{K}_0 \mathbf{N}}$$

其中 $\mathbf{I}$ 为单位矩阵

当 $\mathbf{K}_0$ 为各向同性， $\mathbf{N}$ 为各向异性时：

$$(K)_1 = \frac{K_0}{1 + K_0 N_1}$$

$$(K)_2 = \frac{K_0}{1 + K_0 N_2}$$

$$(K)_3 = \frac{K_0}{1 + K_0 N_3}$$

其中1, 2, 3脚标表示分别沿 $\mathbf{N}$ 的三个主轴方向，

当 $\mathbf{K}_0$ 为各向异性， $\mathbf{N}$ 为各向同性时：

$$(K)_1 = \frac{K_{01}}{1 + N K_{01}}$$

$$(K)_2 = \frac{K_{02}}{1 + N K_{02}}$$

$$(K)_3 = \frac{K_{03}}{1 + N K_{03}}$$

其中注脚1, 2, 3表示分别沿 $\mathbf{K}_0$ 的三个主轴方向。

当然，我们可以通过外场的测试方法，获得 $\mathbf{K}$ ，并根据样品的形状求得 $\mathbf{N}$ ，然后根据上述的公式通过计算得到岩石的固有磁化率 $\mathbf{K}_0$ 。但是，在有关参数是各向异性的条件下这是十分困难的，所以一般宁可在标本加工时加工成特定形状样品，以避免样品形状的影响。由于圆球体的加工困难，一般加工成正方体或圆柱体。从表1可以看出，正方体基本上和球体的退磁系数一样，而圆柱体在 $\frac{a}{b}$ 为0.8—1之间时，接近于球体的退磁系数，曾有不少人对此做过实验，但实际上还与外加磁场的强度等因素有关，一般当在 $\frac{a}{b}$ 为0.85—0.92之间时，对于圆柱形状的岩石样品所测得的视在磁化率 $\mathbf{K}$ 与岩石的固有磁化率最接近。

第二章 磁化率各向异性的数学表象

在弱磁场中,物质内任一点的感应磁化强度矢量 $\vec{J}$,为该点的固有磁化率张量 $\mathbf{K}_0$ 与该点的有效磁场强度矢量 $\vec{H}_e$ 的内积

$$\vec{J} = \mathbf{K}_0 \cdot \vec{H}_e$$

实际上不能测到物体内部的磁场,只能测到外磁场强度矢量 $\vec{H}$,用 $\vec{H}$ 取代上式的 $\vec{H}_e$,我们有

$$\vec{J} = \mathbf{K} \cdot \vec{H} \quad (2.1)$$

$\vec{J}$ 的方向与 $\vec{H}$ 不同,则在数学意义上相当于一个方向变换和伸缩变换算子的 $\mathbf{K}$ 被称为视在磁化率张量。对于外形接近于等轴形的立方形、圆柱形样品所测到的视在磁化率张量 $\mathbf{K}$ 直接与岩石的固有磁化率 $\mathbf{K}_0$ 相关;而且,用以测定磁化率的卡帕桥、旋转磁力仪等,都是直读磁化率值,仪器的刻度经过同样形状的已知固有磁化率的标准样品标定。

为了对磁场强度矢量、磁化强度矢量与磁化率张量这三个物理量进行表征和计算,需要选定一个参考坐标系。我们经常使用的是具有三个相互正交坐标轴的笛卡尔坐标系(x_1 、 x_2 、 x_3),以 $\hat{e}_1$ 、 $\hat{e}_2$ 、 $\hat{e}_3$ 分别表示沿 x_1 、 x_2 、 x_3 轴向的单位矢量,则

$$\vec{H} = H_1 \hat{e}_1 + H_2 \hat{e}_2 + H_3 \hat{e}_3$$

$$\vec{J} = J_1 \hat{e}_1 + J_2 \hat{e}_2 + J_3 \hat{e}_3$$

其中

$$H_i = H \cos(\vec{H}, \hat{e}_i)$$

$$J_i = J \cos(\vec{J}, \hat{e}_i)$$

把(2.1)式在此坐标系中展开,则各分量的关系式为(图2.1)

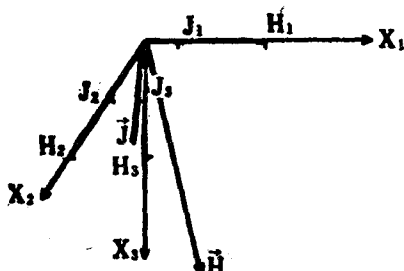


图 2.1

$$\begin{cases} J_1 = K_{11}H_1 + K_{12}H_2 + K_{13}H_3 \\ J_2 = K_{21}H_1 + K_{22}H_2 + K_{23}H_3 \\ J_3 = K_{31}H_1 + K_{32}H_2 + K_{33}H_3 \end{cases} \quad (2.2)$$

(2.2)式的指标形式为

$$J_i = K_{ij}H_j, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.3)$$

(2.3)式表达了沿 $\hat{e}_i$ 方向的磁化强度与沿 X_1 、 X_2 、 X_3 轴方向的磁场的线性关系。其中 K_{ii} 称为沿 X_i 轴向上的正常磁化率， K_{ij} ($i \neq j$)称为交叉磁化率，表示沿 X_i 轴向上的磁场对沿 X_j 轴向磁化的作用。

$\mathbf{K}$ 有两个下标，共有9个分量可用方形的数表——方阵来表示，用矩阵表示就是：

$$[\mathbf{K}] = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

对于上述 $\vec{H}$ 、 $\vec{J}$ 、 $\mathbf{K}$ 的这些分量就可以进行解析运算。

对于磁化率为各向同性的物质，它的分量

$$K_{ij} = K\delta_{ij}$$

K 是某个标量，也就是我们在地球物理工作中作为均匀磁化介质来处理时的总磁化率。这时，(2.3)式成为

$$J_i = K\delta_{ij}H_j = KH_i$$

即，在磁化率为各向同性的物质内，磁场 $\vec{H}$ 与磁化 $\vec{J}$ 的方向是一致的，其交叉磁化率为零

$$K_{ij} = 0, \quad i \neq j$$

磁场对物质的磁化所作的功，一部分通过磁化而贮存于物质中成为磁化能 Ψ ，它是物体内部磁场 $\vec{H}$ (H_1, H_2, H_3) 的函数，只要 Ψ 是 H_1, H_2, H_3 的连续可导的函数，就与求导秩序无关

$$\frac{\partial}{\partial H_1} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial H_2} \right) = \frac{\partial}{\partial H_2} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial H_1} \right)$$

从而导出