

大地介质电磁各向异性问题

J·G· 内 吉 编 著
P·D· 萨拉夫

地 质 出 版 社

大地介质电磁各向异性问题

P 621.5 - 43

地 质 出 版 社

(京)新登字 085 号

Anisotropy in geoelectromagnetism

J. G. NEGI and P. D. SARAF

ELSEVIER 1989

大地介质电磁各向异性问题

[印]J·G·内吉 P·D·萨拉夫 编著

邹永辉 陈德志 译

陈乐寿 审校

*

责任编辑：陈军中

地质出版社 出版发行

(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷

(北京海淀区学院路 29 号)

新华书店总店科技发行所经销

*

开本：787×1092_{1/16} 印张：10 字数：229000

1992 年 5 月北京第一版·1992 年 5 月北京第一次印刷

印数：1—650 册 定价：6.55 元

ISBN 7-116-01078-5/P·908

审校者的话

非常高兴能有机会较仔细地阅读了 J. G. NEGI 和 P. D. SARAF 编著的《大地介质电磁各向异性问题》(Anisotropy in geoelectromagnetism) 一书及其中文译稿, 并参加后者的审校工作。多年的基础理论研究及野外实际测量工作都证明, 地壳上部, 特别是沉积岩系分布地区存在有电磁各向异性。这在深入研究和解释以勘查地球构造为目的的地面电法、电磁法和电测井资料时是必须加以考虑的因素; 否则, 会导致不容忽视的误差, 甚至错误的解释结论。作者汇集了有关大地介质电磁各向异性性质的理论和实际研究的丰富资料, 加以系统化, 涉及了直流电测深、电测井、电磁感应方法、磁大地电流法、深电磁测深等方法中有关电各向异性效应的理论和实际研究成果, 以及考虑各向异性影响时的正演模拟和反演解释技术, 并给出了大量的实验室试验和野外观测的反映有电各向异性效应的实例。每一章后附有丰富的文献索引。本书确实是从事这方面工作的科技人员及应用地球物理专业高年级本科生、研究生应备的参考书。

译者克服了原文中出现的一些语法上的非习惯用法及印刷错误造成的困难, 译文具有较好的可读性。作为一个先睹为快的读者, 愿借此版面向同行们推荐这一本著作。

陈乐寿 1991.12

前 言

石油勘探、全球上地幔计划、地球动力学及岩石圈计划的研究结果表明,许多地区的地壳及地幔上部岩层都是极不均匀的(包括横向的和垂向的);地壳岩层力学和电磁性质均存在着方向相关性(即各向异性)。在物理学领域,尽管早至法拉第(1845年)年代就已研究了电性参数的各向异性效应问题,但在地球物理学领域只是从施伦贝尔热(Schlumberger,1920年)年代起才开始强调直流电法勘探中各向异性的重要性。自吉洪诺夫(Tikhonov)(1959年)研究了第一个大地电磁实例以来,磁大地电流法、感应法勘探、矿井通信、断裂带确定等方面都取得了许多重要进展。仪器观测精度、数据处理及解释技术的提高使得许多学科的研究人员愈来愈重视各向异性效应问题。

本书详细讨论了下述特殊问题:(1)用直流电法圈定各向异性沉积地层;(2)测井测量中的各向异性效应;(3)各向异性大地上感应法中的互阻抗测量(频率域和时间域);(4)在各向异性煤层巷道中的低频通信;(5)用磁大地电流法圈定层状倾斜各向异性和不均匀大地中的地壳岩层;(6)在地球动力学上有意义的地区进行深部电磁测深;(7)侧向不均匀各向异性导体的数值模拟;(8)用反演技术解释各向异性介质情况下的数据;(9)各向异性地层的野外观测和各向异性地层标本的实验室试验结果。第3章及第4章中的大多数资料取自作者在数种印度及国际性刊物中发表的关于大地介质各向异性方面的理论性论文。

本书对科研工作者及大专院校高年级学生解决与各向异性有关的物理学、数学、无线电通信及地球物理学领域中电磁场边界值问题及地球内波的传播问题会有所帮助。

作者真诚地感谢那些慷慨地允许我们从他们的著作、期刊、报告中摘取图表的人们,感谢允许这本书出版的印度国家地球物理研究中心的主任先生,感谢 Shri Ch. Ramas wamy 为书中的计算工作所付出的辛勤劳动。

目 录

前 言

第一章 各向异性大地介质电磁问题概论

§ 1 各向异性	1
1. 引言	1
2. 各向异性研究史	1
3. 各向异性大地	1
4. 数学表达式	3
5. 电导率各向异性	4
6. 促进各向异性研究的一些有意义的观测结果	6
7. 有关各向异性的地电研究	7
§ 2 大地介质电磁学	7
1. 引言	7
2. 大地电磁法	8
3. 地球物理用简化模型和解析方法	9
4. 一般感应问题的解析方程	11
参考文献	11

第二章 直流电法中电阻率测量的电性各向异性

§ 1 引言	13
§ 2 均匀大地电位	14
1. 视电阻率	15
2. 核函数	15
§ 3 各向异性大地	16
1. 各向异性大地的拉普拉斯方程的一般解	18
§ 4 二层各向异性大地	18
1. 电源在地表上方	18
2. 电源在空气与大地界面上	19
§ 5 n 层各向异性大地的核函数	20
1. 计算 $K(\lambda)$	21
§ 6 二层大地核函数	21
§ 7 中间层为均匀各向异性层的三层模型的视电阻率	23
§ 8 各向异性非均匀层	25
§ 9 倾斜各向异性大地	28
1. 均匀半空间	28
2. 顶层为倾斜各向异性的二层层状大地	30
§ 10 各向异性情况的等效各向同性模型	31

1. 二层模型	31
2. 二层大地模型的镜像法	32
3. 三层模型	34
4. 类比关系	35
§ 11 达扎洛克(Dar-Zarrouk)变量和函数	35
§ 12 对各向异性半空间的勘探深度	37
1. 勘探深度	37
2. 归一化勘探深度	37
§ 13 二层各向异性大地上三电位测量法	41
1. 电位表达式	42
2. 温纳装置	42
3. 同线偶极-偶极装置	43
4. 直角装置	44
§ 14 电各向异性对充电法的影响	45
§ 15 各向异性对电阻率测井的影响	48
1. 均匀各向异性介质	49
2. 井孔效应	49
3. 无井孔影响的二层介质问题	51
4. 两层各向异性层中各向同性层的梯度电极系响应	53
参考文献	55
第三章 各向异性大地上偶极源的电磁测深	
§ 1 引言	57
§ 2 各向异性半空间上的垂直电偶极	57
1. 地面阻抗	59
2. 二层大地垂直电偶极	60
§ 3 各向异性半空间上的水平电偶极	62
1. n 层各向异性大地上水平电偶极	65
§ 4 各向异性大地上电流导线的互耦	67
§ 5 置于各向异性介质中的电磁源	69
1. 电磁波从空气到地下介质的传播	69
2. 电磁波从地下介质到地下介质的传播	71
3. 电磁波从地下介质向空气中传播	74
4. 导线间的互耦(一导线置于各向异性层中,另一导线置于空气与大地界面上)	75
§ 6 瞬变耦合(各向异性导电半空间表面上有限电流源间的)	77
参考文献	80
第四章 磁大地电流法探测中各向异性效应	
§ 1 磁大地电流法	82
1. 引言	82
2. 方法原理	82
3. 磁大地电流变化的记录	83
4. 磁场记录	83
5. 电场记录	83

6. 记录系统	83
7. 理论	83
§ 2 磁大地电流法中的各向异性	85
1. 在各向异性大地中的趋肤深度	85
2. 倾斜各向异性地电模型的磁大地电流测深	86
3. 倾斜各向异性半空间模型	86
4. 二层大地模型	87
5. 三层大地模型	98
6. n 层各向异性半空间模型	106
参考文献	110
第五章 有关各向异性研究的问题	112
§ 1 模拟模型研究	112
1. 大地电磁模型	112
2. 各向异性导体上电磁模拟模型研究	114
3. 估算含水层宏观电各向异性系数的模型	116
4. 模拟隐伏断层的模型结果	118
§ 2 数值模型	119
1. 引言	119
2. 有限元法解横向非均匀各向异性介质的磁大地电流响应问题	119
3. 有限差分法解横向不均匀各向异性块体的磁大地电流响应问题	121
4. 非均匀二维构造的各向异性视电阻率	124
§ 3 岩石物性	124
1. 引言	124
2. 前寒武纪岩石的电各向异性	125
3. 顽辉石的电导率各向异性	129
§ 4 反演问题	129
1. 广义线性反演法	129
2. 各向异性解释	132
参考文献	133
第六章 电各向异性的地球物理应用及实例	
§ 1 电各向异性的应用研究	136
§ 2 与各向异性地层有关的地球物理实例	137
1. 美国西南部电阻率测量	137
2. 亚利桑那州凯恩塔(Kayenta)的电阻率测深	137
3. 犹他州阿内斯(Aneth)电阻率测深	138
4. 科罗拉多州牛津(Oxford)地区的电阻率测深	138
5. 缅因州北部填图	138
6. 瑞典北部甘贝格(Kanberg)矿床	139
7. 法国某一喀斯特地区的破碎物质	139
8. 印度安得拉邦 Godavari 东部 Rajahmundry 地区储水层厚度的估算	139
9. 德国西部沿海岸地区粘土和砂构成的各向异性地层	139
10. 弗兰博(Flambeau)铜矿床	140

11. 磁大地电流各向异性	140
12. 应用磁大地电流各向异性研究扩张构造	147
13. 地震预测	148
§ 3 结论	149
参考文献	150

第一章 各向异性大地介质电磁问题概论

§ 1 各向异性

1. 引言

物体物性随方向变化的性质定义为各向异性。众所周知,物质的物性不随方向变化是例外的。不同尺度的物质普遍存在着程度不同的各向异性现象:

1. 在整个宇宙中:在银河系、星际空间、太阳系以及地球的不同地层中,物质和各类荷电粒子具有优先分布的形式;
2. 层状地球中:因非均匀应力、热对流、温差和物质迁移,在地壳、地幔、地核中出现电性、磁性、热力学性质的各向异性;
3. 在地球上的绝大多数结晶固体中,如岩石、砂、冰等,由于原子或分子排列随方向变化而具有各向异性;
4. 在不同尺度的生物物质中,微观的和宏观的,也存在各向异性。

2. 各向异性研究史

晶体各向异性现象的研究可追溯到 1670 年。当时, E. Bartholinus 发现了方解石的双折射现象。在 18 世纪和 19 世纪, Benjamin Wilson、Faraday、Kerr、Pierre 和 Curie 以及其他学者证明,通过某些物理作用,如加热、加强磁场或电场、单向机械应力,也能使物质具有各向异性。这些各向异性现象的研究已为了解下述领域中的若干基本现象奠定了基础:

(I) 磁等离子体:更充分地认识了宇宙现象、热核反应、行星间飞行的离子驱动力和通过电离层的洲际间无线电传播。

(II) 固体物理:各向异性晶体在不同方向上的光学特性是不同的。各向异性晶体中的原子在某些面上的分布要比另外一些面上的分布更为密集。这些原子的分布在物质中显示出对称性。晶体的对称性变化将影响其外形和物性,即:(a)晶体不同方向上的电导率不同;(b)在光学特性上,晶体将一束光分成两个相互垂直的线偏振光束,一条为常光,一条为非常光。常光在各方向上的传播速度是相同的,而非常光在不同方向上具有不同的速度。

(III) 生物显微学:由于毛细管中水的流动和重力作用,植物经常呈现柱状对称性和稳定性。

3. 各向异性大地

地球的不规则性由其物理参数表征。因此,地球物理学家们对不均匀性(垂直方向和水平方向)和各向异性问题很感兴趣。随着野外观测精度的提高和对地球内的波(地震波/电磁波)的特征的更进一步了解,人们不再忽视各向异性问题。为模拟地球的实际状态,仍然采用各向

同性的假设是不合理的,其理由是:

(I) 岩石往往具有明显的各向异性,其主要原因是矿物的某种优先排列。

(II) 地壳上部是各向异性的。这是由于受到非岩石静应力的影响,使裂隙成不同方向排列。

(III) 海洋沉积物的各向异性。这是由于沉积物颗粒在某方向优先沉积和洋底横向扩张作用所致。

(IV) 岩组学和弹性研究的证据,揭示了上地幔岩石的各向异性。

(V) 理论和实验表明,在俯冲的岩石圈板块中的橄榄石晶体具有各向异性。软流圈中局部熔融物质的物性参数可能具有对称的垂直轴的单轴各向异性。

各向异性类型

为方便起见,将物质的各向异性形式分为3种基本类型(Crampin等,1984):

(I) 固有各向异性:当一个物体具有均匀、连续各向异性时,称该物体具有固有各向异性。这种现象可能是由于:

(a) 晶态各向异性:结晶体中单个各向异性晶体具优先方向,当这种优先大到足以影响短波传播时即出现晶态各向异性。地震和电磁波方法观测到的上地幔各向异性就是橄榄石和斜方辉石晶体的优先定向所致。

(b) 应力诱发各向异性:当在一定方向上施加足够大的应力时,原来各向同性固体即可变为各向异性体。在绝大多数的环境中,岩石中的微裂隙受到水平向偏应力作用后可能张开或定向排列的程度远小于正应力产生各向异性程度。

(c) 岩性各向异性:当单个颗粒在沉积过程中受到流体的重力作用而被拉长或压扁时,沉积柱则显示出岩性各向异性。横向各向同性的粘土和页岩有可能因这些重新排列的颗粒而导致各向异性。

(I) 裂隙诱发各向异性:地壳中的在裂隙或孔隙中充填了液体的大块物质具有相对优先定向,也可能反映出各向异性。这些裂隙在结晶地壳中受各种非岩石静应力和应力诱发过程的作用,可能呈优先排列。另外,受次生裂隙的作用也可能出现再排列。在地壳中,特别是在其浅部,显示出水平各向异性,在火成岩中清楚可见此类微裂隙。

(II) 长波长各向异性:当波通过不同组分和厚度的薄层各向同性层序列传播时,可见到长波长各向异性,也可称为周期性薄层各向异性。大的扰动区的长的线状构造、节理和断裂系可显示出长波长各向异性。在海沟、洋中脊和裂谷带可以见到此类长波长各向异性。

地球物理应用

(I) 研究地球内部不同区域的演变和结构:人们已建立评估应力变化的实际模型。应力的累积可能导致产生新的裂隙,如果裂隙定向排列,其结果将显示出各向异性。应力产生的效应可以通过裂隙诱发的各向异性对波传播的影响进行监视。这些大范围扩容各向异性(EDA)为一些震前观测到的大面积的地震先兆提供了成因上的解释依据。

(II) 阐述有关假说:(a)由线性构造演变成新的岩石圈;(b)板块的横向运动;(c)与洋中脊、转换断层和海槽有关的大地构造过程。大洋岩石圈各向异性研究为分析定向的洋底地球动力学过程提供了一种有效手段。

(III) 圈定地壳中的裂隙分布:在水文地质应用和地热勘探中,用电法勘探可以精确地确定裂隙位置。如果地热储岩石中有一组充填有导电热水的平行的裂隙,电导率可能呈现显著的

各向异性。热收缩也可以形成视各向异性带。各向异性的研究可以帮助了解深部裂隙的主体方向。煤层中的各向异性效应是由于层间小裂隙所致。

(IV) 圈定含油构造: 电导率各向异性值的变化反映了沉积层序列的岩性变化。综合研究电阻率和电阻率各向异性的变化, 为圈定含油构造提供了一种有效手段。

在实验室中对各种岩石标本进行试验的结果表明, 各向异性值是变化的, 主要与岩石的应力状态有关。

4. 数学表达式

物理量的各向异性现象研究具有一定的通用的基本准则, 常采用张量形式表示(如表 1、表 2 所示)。

在各向异性晶体的电性研究中, 若沿着除坐标轴 x 、 y 、 z 轴向以外的方向施加一电场 E , 则电流密度 J 表示为:

$$\begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

式中($\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \dots, \sigma_{33}$)是电导率张量的 9 个分量, 它们确定了 J 的方向和大小。

在单斜晶体中(即 z 轴与二次轴一致)旋转 J 和 E , 电导率张量 σ_{ik} 变为:

$$\vec{(\sigma_{ik})} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (1.2)$$

在研究等离子体介质的介电常数和磁铁矿的导磁率时, 可见这种斜对称张量类型。

表 1 各向异性的张量表示

序号	物性参数	物理量		定义方程	张量类型
1	电导率	电场 E_k	电流密度 J_i	$J_i = \sigma_{ik} E_k$	σ_{ik} 是二阶张量
2	介电常数	电场 E_k	电位移 D_i	$D_i = \epsilon_{ik} E_k$	ϵ_{ik} 是二阶张量
3	导磁率	磁场 H_j	磁感应强度 B_i	$B_i = \mu_{ij} H_j$	μ_{ij} 是二阶张量
4	弹性参数	应力 σ_{RL} 二阶张量	应变 K 二阶张量	$\sigma_{ij} = K_{RL} (S_{ijRL})^{①}$	S_{ijKL} 是四阶张量
5	热传导率	负的温度梯度 $-\frac{\partial T}{\partial x}$	热流密度 h_i	$h_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}$	k_{ij} 是二阶张量

①原文为 $K_{ij} = \sigma_{RL} (S_{ijRL})$, 译者

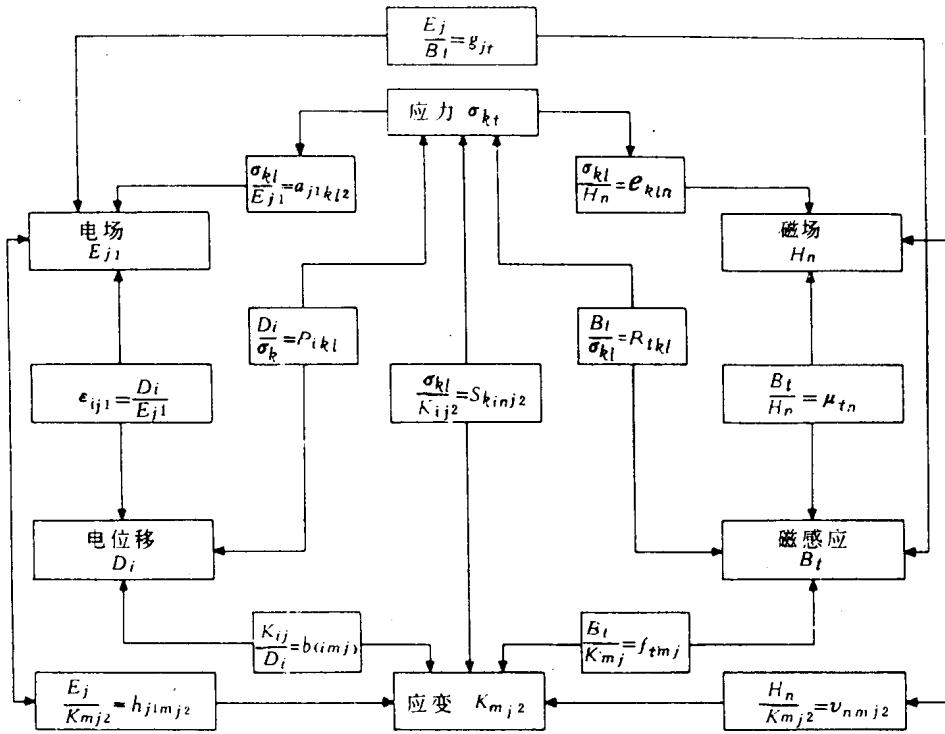
在选择 x 、 y 、 z 与二次轴一致的晶体中, 电导率张量简化为:

$$\vec{(\sigma_{ik})} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (1.3)$$

而在单轴晶体中, 电导率张量进一步简化为:

$$\vec{(\sigma_{ik})} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (1.4)$$

表 2 物性的共同基本特性



5. 电导率各向异性

在矿物, 矿石, 岩石, 裂隙和地层的物性参数中, 电导率变化范围比其它物性参数(即密度、磁化率及弹性参数等)的变化范围大。电导率的变化范围可达 $10^{-14} - 10^6 \text{S/m}$, 如表 3 所示。由于实际地层的形状、大小和性质变化无穷, 其结果导致地球壳层的电导率呈非均匀性和各向异性特征。

引起电导率各向异性的原因

(I) 裂隙和孔隙的排列: 在地壳的岩石中, 裂隙分布具有一种优先定向性(可能与构造应力场、温度梯度、重结晶作用有关), 这导致电导率出现各向异性。

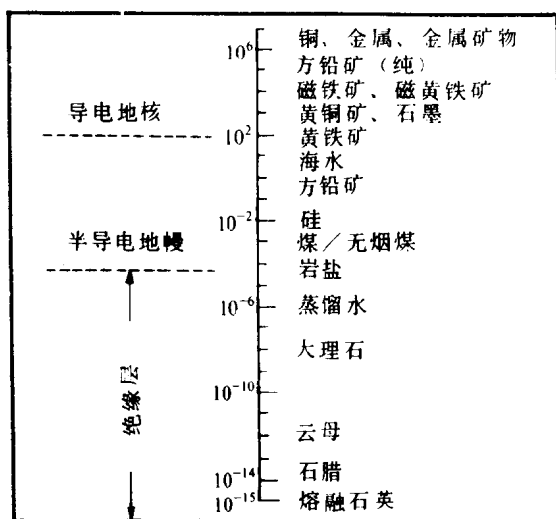
(II) 组分的层理分层。

(III) 矿物颗粒的优先排列方向: 大量的矿物晶体(高岭土、云母等)在沉积过程中被拉长或压扁, 因而获得一个平行于层理的定向排列。由于含有导电矿化水的孔隙沿层理面排列, 致使电流沿层理面的流动较垂直于层理面的流动容易, 因而引起电导率各向异性。在某些情况下, 各向异性效应极其明显。在硬石膏和页岩互层中, 纵向电导率比横向电导率大 15 至 50 倍(Keller Frischecht, 1966)。

电导率各向异性研究涉及下列应用:

(1) 圈定沉积地层中的油气储层;

表 3 电导率谱



- (I) 确定地热田的裂隙带和做为水文地质中储水层的存在裂隙的介质;
- (II) 圈定与地球动力学过程、地震预报有关的深部线状构造;
- (III) 地下通讯等(应用各向异性的野外观测, 详见第六章)。

各向异性参数

各向异性系数(m)的定义是纵向电导率(σ_L)与横向电导率(σ_t)比值的平方根, 即 $m = (\sigma_L / \sigma_t)^{1/2}$ 。表 4 列出了一些地层和岩石的各向异性系数的常见范围。

在理想的各向同性状态下, $m=1$ 。一般情况下, $m>1$ (即 $\sigma_L > \sigma_t$), 页岩节理、断裂带及垂直裂隙介质, $m<1$ 。通过测定碎屑岩层序列中各向异性系数可确定砂岩与页岩的比值。同样地, m 也反映了页岩及石灰岩或蒸发岩层序列中化学碎屑的比例。

表 4 一些岩石和地层的各向异性系数范围

序号	类型	m	范围	序号	类型	m	范围
1	冲积层	1.02	1.10	9	石灰岩	1.00	1.14
2	干燥页岩 固结页岩	1.10	1.60	10	含磁铁矿角页岩	1.20	
		1.10	1.60				
3	煤—无烟煤 沥青质的	2.00	2.55	11	磁铁矿	1.65	
		1.70	2.60				
4	辉长岩	1.10	2.00	12	页岩层	1.02	1.05
5	花岗岩	1.05	1.50	13	砂岩层	1.10	1.60
6	石墨板岩	2.00	2.80	14	绿泥石片岩—黑云母	1.12	
7	硬石膏和页岩互层	4.00	7.50	15	板岩	1.10	2.25
8	页岩、砂岩互层	1.05	1.15	16	火山岩	1.10	1.20

电导率的微观各向异性和宏观各向异性

用下述方法判别地电研究中的微观各向异性和宏观各向异性：

(a) 微观各向异性：出现在成层的具有均匀构造的岩石中。被含水毛细管薄层分隔开的粘土层中被拉长的和压扁的晶体，即为微观各向异性的例子。

(b) 宏观各向异性：

(I) 存在顺序平行的且不同数值的电导率；

(II) 裂隙分布具优先方向；

(III) 长的线状构造，等等。

甚至不同电导率和有限厚度的两个薄层的性质也类似于均匀各向异性介质。与含油构造有关的砂岩、页岩交互层是宏观各向异性的极好例子。另外，变质铁矿建造也具有强的各向异性，这是由于非铁矿石与磁铁矿、镜铁矿的交互带引起的。

微观各向异性和宏观各向异性的差异是不很明确的，而且无法找到一种方法能从层状地层总的各向异性中分离出微观各向异性。总的各向异性是微观各向异性和宏观各向异性的共同作用结果。砂页岩的互层是同时存在微观各向异性和宏观各向异性的典型例子。

各向异性介质中的直流电流

将一供电电极置于低阻层(σ_c)和高阻层(σ_r)互层的各向异性介质中，低阻层和高阻层的厚度 p_c ($\approx 1/100$ in)^①和 p_r 。Guyod(1952)指出高层中的电流因受阻而使电流畸变(图1)。

图2为图1的略图，实线表示电阻层 p_r ，两实线间的空间为导电层 p_c 。电流线趋向层界面， σ_c/σ_r 和 p_c/p_r 的比值表征了各向异性程度或各向异性系数。

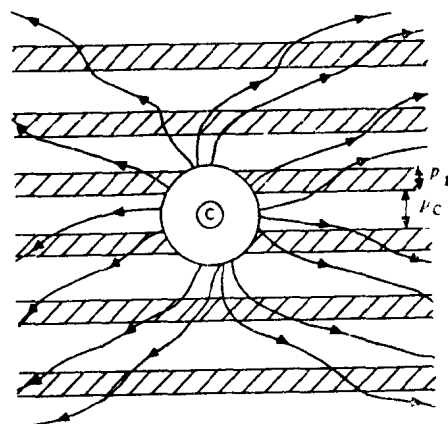


图1 各向异性介质中的电流

6. 促进各向异性研究的一些有意义的观测结果

(I) 在一个地区一剖面中同时存在高电导率和低电导率，则该地区物性各向异性系数值很大；反之，在各向异性系数值小的地区，电导率差则非常小。

(II) 夹在各向异性页岩中的细砂和砂岩的视电阻率值要比在相应数值各向同性介质中得的视电阻率值小。这种视电阻率值的减少随夹层的变薄和页岩各向异性值的增大而更明显。

(III) 较老的和较深的地层也可以反映出较强的各向异性。在第三纪砂岩地层中，各向异性一般较小。在大陆中部的较老地层中，估计各向异性大很多。

(IV) 在片状导体中(由非导电层隔开的大量的导电薄层组成的)，当发射源和接收装置的位置互换时，倾角方向相反。利用这种明显的各向异性特征，能从大范围的导体中区分出强各向异性的导体。在已发生变质作用的沉积地层中经常观测到这种各向异性特征。

(V) 不规则沉积作用和不同形式的侵蚀作用也可产生到各向异性效应。

(VI) 由于各向异性效应，视电阻率曲线在消亡板块边缘(即太平洋和古地中海海岸线)附

① 1in=0.0254m

近发散,在前寒武纪地盾和地台上也具有类似特征。如果沿构造的走向和倾向测量,则可观测到最大的各向异性。磁大地电流参数的各向异性为研究与洋中脊有关的深部线状构造提供了一种有效的手段(Stegena 等人,1971)。

7. 有关各向异性的地电研究

早在1920年,即开展直流电法勘探的初期,施伦贝尔热认识到了电导率的各向异性问题。1932年,R. Mallet 和 H. G. Doll 提出了计算各向异性大地中电场的方法。在30年代初期,施伦贝尔热和其他学者又对地面电法和地球物理测井方法中的各向异性问题及各向异性岩石进行了实际研究。Tikhnov 在1959年首次阐明了各向异性对穿导电性大地的低频电磁波传播的影响。其后,在地球物理文献中还见到下述几方面的文章:

- (I) 直流电阻率法中的电性各向异性;
- (II) 测井中的电阻率各向异性;
- (III) 低频电磁波传播中的电性各向异性问题。在低频矿山通信中,频率域、时间域的各向异性的问题;
- (IV) 磁大地电流中的各向异性效应;
- (V) 深部磁法勘探中的各向异性;
- (VI) 电性各向异性的数值模拟和实验室试验;
- (VII) 资料解释和实例。

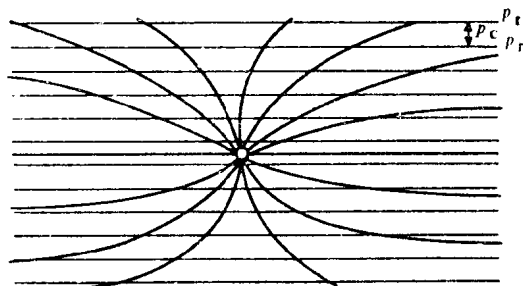


图2 各向异性层中点源场电流分布图

§2 大地介质电磁学

1. 引言

引力作用、电磁作用、弱相互作用和强相互作用是宇宙中物质间相互作用的基本形式。许多著名物理学家,如 Faraday、Gauss、Gilbert、Green、Kirchoff、Poincar、Rayleigh、Sommerfeld、Lorentz、Thomson 等对电磁场研究作出了卓越贡献,使电的应用达到了现今如此广泛的程度。科学家们的先行工作为电磁波各方面的研究提供了理论基础。随着快速计算技术的出现和应用,复杂条件下的二次电磁场的计算已成为可能,其公式和数值结果也有助于其它领域的研究。当今电磁学的研究已成为物理学家、化学家、生物学家和其他应用学科的科学家的综合学科的活动,借以揭示物质的相互作用和现象。法拉第基本定律,即导电区中导体感应电流改变了入射电磁场,是感应研究的基础。分析改变的电磁场,从而获得引起这种变化的物体的电性、大小和产状、位置方面的信息。实际上,地层的产状、大小和物性变化无穷。在地电和大地电磁方法中,这些物性参数具有重要意义,如电导率差。矿物、矿石、岩石和地层的电导率值变化范围达 $10^{-14} - 10^6$,如表3所示。

从理论上讲,地电和大地电磁方法是较完善的勘查地球物理方法。近年来,在理论和仪器

方面所取得的新的进展,使电磁法在定量计算大地构造方面有了更广泛的应用。

- (I) 工程地球物理:为基本建设勘查基底深度;
- (II) 石油勘查:圈定与含油气构造有关的地层;
- (III) 评价地热储;
- (IV) 金属矿勘探;
- (V) 研究深部地质构造等。

电磁法的一个突出特点就是方法的灵活性,即电磁场源可以是天然的也可以是人工的。对于圈定浅部($\approx 300\text{m}$)的电性构造这类小范围问题,可以使用音频磁大地电流法。圈定大的深部构造(深达 300km)这类大范围问题,可以使用大地电流、磁大地电流、地磁差分方法(频率范围为 $10^{-5}-1\text{Hz}$)。测量天然的或人工的电磁场,可以获得地下电性参数分布的信息。对不同研究目的,就其工作难易程度而言,每种类型的场源均有其特殊的优点,即:

(I) 随着仪器的改进,目前磁大地电流法在有利地区可圈定数百公里深度的深部构造;人工场源的方法,其勘探深度尚未超过数十公里。

(II) 磁大地电流法的精度比人工场源电磁法的精度相对要低。

大地电磁法可以用于下列两种不同目的:

(I) 电磁测深:目的是寻找或圈定与地层和温度变化有关的水平电性不连续面。按两种途径实施电磁测深:

(a) 频率测深:改变频率而保持发射接收(T-R)装置距离不变。频率测深的主要特点是,仅通过改变电磁场的频率,计算作为深度函数的电导率剖面。多频测量提供了寻找隐伏金属矿导体的可能性。

(b) 电磁几何测深:增大 T-R 系统间的距离(频率保持不变),得到不同深度处的电导率。

(II) 电磁剖面法:目的是寻找电导率高的局部地段(即金属矿床、断层、沉积盆地、高温地带等),其测量方式是在感兴趣的地区沿剖面逐渐移动 T-R 装置。

2. 大地电磁法

常用的大地电磁法有:

(I) 地磁测深:用于探测地壳和上地幔横向电导率不连续性。地磁场随时间变化而在地下导体(非均匀体)中产生感生电流,引起地表二次磁场变化。在地磁记录中实时记录地磁场(日变和磁暴或微脉动产生的谐波信号)的三个正交分量。

(II) 磁大地电流法(MT):在地表同时测量磁场及与其相伴的电场的变化量,用于确定地壳和上地幔分层情况。在过去的 20 年中,因仪器装备和解释技术的改进和提高,大大地促进了磁大地电流方法技术的发展。这种方法最适用于:(a)确定大范围的深部电导率分布特征;(b)油气勘探中的盆地评价。磁大地电流法的突出优点之一,就是能用于常规地震方法难以开展工作的地区(火山岩和变质岩区,详见第四章)。

(III) 可控源电磁法:可控源电磁法可分为:(a)定源法:即场源(发射装置)是固定的,接收装置是移动的。其中包括倾角法、Beiler-Watson 法、双框法、Sundberg 法、土拉姆法等。(b)动源接收装置法:包括斯陵格兰姆法和圈-框法等。上述方法之间仅存在 T-R 排列方式的差异,即:(1)两个线圈(T-R)为水平、共面,见图 3;(2)两个线圈(T-R)为垂直、共面;(3)两个线圈(T-R)为垂直、共轴;(4)一个线圈(T)为水平,另一线圈(R)为垂直。

(IV) 瞬变场法:这种方法能明显地降低表层非良导体造成的地质噪音,增强良导体的响应。从理论上讲,瞬变响应是频率响应的拉普拉斯变换,反之亦然。所以说,与其它类型的数据相比,此类数据并未包含新的信息。从原理上看,瞬变场法和谐波变场法相比,并无独特优点。若用瞬变场法能确定低阻覆盖层下的良导体,用多频谐波变场法也可确定;反之亦然。就目前的技术发展状况看,瞬变电磁法具有操作简单、成本低廉的优点,而且仪器也比宽频带多频仪器易于生产。目前发展的各种电磁方法,能在地面、空中和井中开展工作。

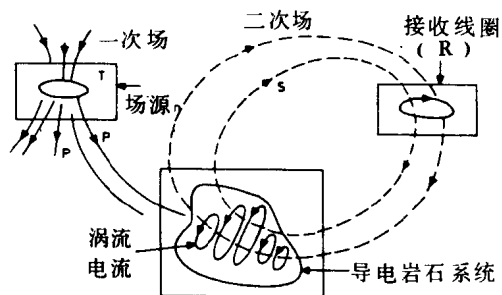


图3 电磁法的发射接收系统

上述方法均应用电磁感应原理。尽管测量速度有时比位场方法慢些(目前,航空电磁法已基本克服了这一弱点),但电磁方法精度较高,能获得更多的有关隐伏矿床的形状和位置的信息。这些方法在瑞典、加拿大等国家取得了很好的效果,发现了一批有重要价值的有色金属矿床。

3. 地球物理用简化模型和解析方法

辅以区域地质资料对地球物理观测数据进行解释,可以获得对圈定有经济价值的矿床有用信息。推断解释获得的地质结果的可信度,取决于解释所用的数据质量和方法。推断解释可以用直接的和间接的两种不同方式。直接方法利用所获得的实测异常,反演得问题的解;而间接方法则是提出一个符合已知条件的电导率和磁化率分布结构(在电法勘探中),然后将理论计算的异常与实测的进行对比,直至最佳拟合为止。有时根据已知地质条件、已往的经验和实测的场的特征,可以对矿体形状进行粗略假设。实际上,规则几何形状的地质体是很难找到的,但在许多情况下,仍可足够精确地将这些地质体近似为一些形状规则的解释模型,以便用于解释研究。

实际的地层的形状、大小和特性变化是无穷的,是经过不同物理化学作用而形成的。目前许多研究工作都是研究与一些良导性金属矿有关的近似的解释模型。这些矿床中的绝大部分是由热液作用形成的。Lindergren(1933)曾这样描述过:“这些矿床是由外来物质的进入和充有岩浆挥发组分的不同成因的上升热液的共同作用而富集形成的”。这些上升热液可以充填在:(a)岩石的固有孔隙中;(b)裂隙带或矿物质溶解所引起孔隙中。

或者是温度降低和压力减少,热液达到饱和,或者是因为固体与液体接触而发生化学反应,在有利条件下,金属矿组分沉淀而最终形成矿体。这些矿体的形状各式各样,主要与热液通道的形状有关。按其特征可分为如下几类(Mokinsty, 1955):(I)层状矿床或整合矿床;(II)矿脉;(III)浸染矿床;(IV)溶洞充填型矿床;(V)筒状和管状矿床。

(I) 层状矿床或整合矿床:

许多矿体在一定的层位优先形成。沿走向延伸的长低矿化且矿化宽度有限的冲断带可近似为一有限宽度的无限延伸的板状体。沿层面分布的缓倾斜整合矿床也可近似为上述板状体。

(II) 矿脉: