

56.277  
5640

# 大地电磁 测深法教程

石应骏 刘国栋 吴广耀 王家映 编著  
王华俊 王光镔 吴乃爵

高等学校  
教学用书

地震出版社

高等学校教学用书

# 大地电磁测深法教程

石应骏 刘国栋 吴广耀 王家映  
王华俊 王光镔 吴乃爵 编著

地震出版社

1985

## 内 容 提 要

本书为应用地球物理专业教科书。书中介绍了天然电磁场和地球内部介质电学性质的一般特点；电磁测深法的数学物理基础；一维、二维介质模型的正演问题；仪器设备和野外工作方法；观测数据的整理方法；资料的定性和定量反演解释方法；以及国内外应用电磁测深法的实例。本书可作为深部地球物理探测专业大学本科教材，亦可作为从事地球物理研究工作人员的参考书。

### 大地电磁测深法教程

石应骏 刘国栋 吴广耀 王家映  
王华俊 王光镔 吴乃爵 编者  
责任编辑：姚家權

---

地质出版社出版

北京复兴路63号

1201工厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

---

850×1168 1/32 8<sup>3</sup>/<sub>4</sub>印张 220千字

1985年9月第一版 1985年9月第一次印刷

印数 0001—

统一书号：13180·261 定价：2.50元

## 编写说明

本教程是根据国家地震局1978年教材会议的决定组织编写的。书中概论、第三、四章由石应骏(成都地质学院)编写；第一、二章由王华俊(中国科学技术大学)编写；第五、十章由刘国栋(国家地震局地质研究所)编写；第六章由吴乃爵(成都地质学院)编写；第七章由吴广耀、王光镔(武汉地质学院)、吴乃爵编写；第八章由王光镔、吴广耀编写；第九章由王家映(武汉地质学院)编写。

本教程初稿曾在1979年国家地震局所办短训班试用，1980年完成修改稿，并召开了审稿会议。根据与会者的意见，作者于1981年再次进行修改，由武汉地质学院北京研究生部副教授陈乐寿同志再审，最后由石应骏对全书统一整理、修改定稿。

# 目 录

概 论	( 1 )
第一章 地球的天然电磁场	( 7 )
§1.1 天然电磁场的一般特性	( 7 )
§1.2 大地电磁场的变异	( 10 )
§1.3 天然交变电磁场的源	( 15 )
第二章 地球电学性质简介	( 19 )
§2.1 地球电性分布的一般特点	( 19 )
§2.2 地表浅层岩石的电阻率	( 20 )
§2.3 深部岩石的电阻率	( 23 )
§2.4 壳内高导层和上地幔高导层	( 31 )
第三章 均匀层状介质大地电磁测深理论	( 35 )
§3.1 电磁场基本方程式	( 35 )
§3.2 平面电磁波在均匀大地介质中的传播	( 40 )
§3.3 层状一维介质的正演问题	( 47 )
§3.4 层状一维介质理论曲线的计算和图示	( 55 )
§3.5 视电阻率曲线的渐近线	( 74 )
§3.6 视电阻率曲线的等值性	( 80 )
第四章 水平不均匀介质大地电磁测深理论	( 83 )
§4.1 各向异性介质中的大地电磁场	( 83 )
§4.2 二维介质大地电磁测深的正演问题	( 90 )
§4.3 二维介质的阻抗张量	( 99 )
§4.4 三维介质的阻抗张量	( 104 )
§4.5 一维、二维和三维介质的判别	( 108 )

---

<b>第五章 大地电磁测深的仪器系统</b> .....	(111)
§5.1 电磁场接收器.....	(111)
§5.2 仪器的放大系统和滤波系统.....	(120)
§5.3 模拟记录和数字记录系统.....	(127)
§5.4 仪器的标定和噪声的度量.....	(131)
<b>第六章 野外工作方法</b> .....	(137)
§6.1 测点的布置.....	(137)
§6.2 测量系统的敷设.....	(138)
§6.3 观测方法.....	(140)
§6.4 几种常见的干扰及其克服办法.....	(142)
<b>第七章 大地电磁测深观测资料的整理</b> .....	(147)
§7.1 阻抗张量元素的求取.....	(147)
§7.2 用傅氏变换法进行资料整理.....	(155)
§7.3 用时间域滤波法进行资料整理.....	(170)
§7.4 用统计功率谱分析法进行资料整理.....	(179)
§7.5 克服测量噪声影响的其它措施.....	(181)
<b>第八章 大地电磁测深资料的定性解释</b> .....	(188)
§8.1 大地电磁测深曲线的分析.....	(188)
§8.2 大地电磁测深曲线的定性解释.....	(197)
§8.3 非一维构造定性解释的其它方法.....	(200)
<b>第九章 大地电磁测深曲线的自动反演解释</b> .....	(204)
§9.1 曲线自动反演解释的基本原理.....	(204)
§9.2 用麦夸特法作曲线反演解释.....	(224)
§9.3 用修改的牛顿-拉甫生法作曲线反演解释.....	(228)
§9.4 一维曲线反演解释的实例.....	(233)
<b>第十章 大地电磁测深法的应用</b> .....	(240)
§10.1 大地电磁测深法在探测沉积盆地和 普查石油、天然气田中的应用.....	(240)
§10.2 应用大地电磁测深法研究地壳和上地幔结构.....	(250)

§10.3 应用大地电磁测深法研究地热场·····	(258)
§10.4 大地电磁测深法在地震预报中的应用·····	(264)
参考文献·····	(268)

## 概 论

大地电磁测深是研究地壳和上地幔构造的一种地球物理探测方法。它以天然交变电磁场为场源，当交变电磁场以波的形式在地下介质中传播时，由于电磁感应作用，地面电磁场的观测值将包含有地下介质电阻率分布的信息。而且，由于电磁场的集肤效应，不同周期的电磁场信号具有不同的穿透深度，因此，研究大地对天然电磁场的频率响应，可获得地下不同深度介质电阻率分布的信息。

苏联学者吉洪诺夫(А. Н. Тихонов)最先提出了这一设想，他在1950年指出：(1)大地电磁场本身结构虽然十分复杂，但场源可近似地看成为平面波垂直入射大地。(2)若引入波阻抗的概念( $Z = \frac{E}{H}$ )，它可用于表征地球电性分布对大地电磁场的响应。(3)利用单点大地电磁场观测研究地球电性分布是可能的。随后，1953年法国学者卡尼尔(L. Cagniard)论证了场源为垂直入射的平面波，在大地介质是水平均匀层状分布的条件下，相应大地电磁场的解，并把阻抗响应变换为习惯的视电阻率形式：

$$\rho_T = 0.2T |Z|^2,$$

其中  $|Z| = \left| \frac{E_x}{H_y} \right| = \left| \frac{E_y}{H_x} \right|$  是波阻抗，亦称标量阻抗。 $E_x, E_y, H_x, H_y$  为地面上互相正交的电磁场分量的振幅谱。地面波阻抗  $Z$  是地下介质电阻率分布和信号周期  $T$  的函数。

这两篇论文奠定了早期大地电磁测深法的理论基础，所论述的模型亦称吉洪诺夫-卡尼尔模型。从此，大地电磁测深法引起了广大地球物理工作者的重视，成为研究地球内部电性结构的一



种全新的方法。

从方法理论的提出，到最初野外实验性探测，大概经历了六、七年的时间。因为周期为几秒到几千秒的大地电磁场，其磁场强度一般只有一毫伽马到几十伽马，所需超低频、宽频带、高灵敏度的大地电磁测深仪在制作上比较困难，所以长期未能试制出可供流动观测用的大地电磁测深仪器。

苏联于1957年研制出第一台用于大地电磁测深的地磁仪，其磁场接收器是基于静磁原理的磁变仪，记录系统采用一般光点模拟照相记录。这种仪器用于大地电磁测量十分勉强，它的灵敏度约为几伽马，温度影响大，需要较长的观测时间，以等待较强的大地电磁信号的出现。

六十年代法国、美国、苏联、加拿大等国都进一步着手仪器的研制工作，试制出感应式和饱和式磁场接收器。记录部分也由一般可见模拟记录进而采用模拟磁带和数字磁带记录，后者大大提高了资料整理的速度和精度。目前，先进的大地电磁测量系统，其磁分辨率约为1毫伽马，采用数字磁带记录，或者直接装配有微型数字处理系统，在野外即可完成数据的初步处理和解释工作。

理论研究开始时围绕着场源模型和介质模型两方面问题进行。场源平面波模型曾引起激烈的争论，许多学者对该模型的适用性提出异议。研究表明，对于地壳和上地幔这一深度范围内的探测，其观测信号的周期小于 $10^3-10^4$ 秒，场源的平面波模型是适用的。一旦观测研究更长周期的信号，如果仍然采用平面波模型进行计算，就必须引入校正项，校正项与场源信号周期、地球曲率、地下介质电性等因素有关。

在大地介质的电阻率分布模型方面，五十年代计算了一系列水平层状介质模型的视电阻率理论曲线，即一维模型理论曲线。编绘有二层和三层理论曲线册(量板)，用于实测曲线的分析和解释。然而，这种一维介质模型在实际应用中有很大的局限性。野

外工作中经常发现同一测点由两组正交电磁场所求得的视电阻率曲线并不一致:

$$\rho_{xy} = 0.2T \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2,$$

$$\rho_{yx} = 0.2T \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2,$$

$$\rho_{xy} \neq \rho_{yx}.$$

它表明地下介质存在电阻率的水平不均匀性或各向异性。于是,许多学者开始对二维、三维和各向异性介质模型进行研究。研究结果表明,它们的电磁场结构与水平层状介质模型截然不同。一维介质波阻抗是与测量轴方位无关的标量阻抗:

$$|Z| = \left| \frac{E_x}{H_y} \right| = \left| \frac{E_y}{H_x} \right|,$$

其电磁场关系为:

$$E_x = |Z| H_y,$$

$$E_y = -|Z| H_x.$$

而二维、三维模型中的电磁场关系是:

$$E_x = Z_{xx} H_x + Z_{xy} H_y,$$

$$E_y = Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y.$$

可以写成:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = [Z] \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix},$$

其阻抗是一张量:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}.$$

目前,利用电子计算机通过对二维介质中电磁波所满足的偏微分方程求数值解,已求得一系列二维介质模型的视电阻率曲线。配合物理模型实验和网络模拟研究,已有二维理论曲线册发表。三维介质的研究比较困难,但也有一些研究成果的报导。

大地电磁测深法的野外观测记录都是在时间域内进行的,观测资料的整理工作首先必须从时间域的电磁场测量结果,求出频率域不同周期成份的振幅谱。这一工作最初是从模拟记录的示波图上选取场的谐变波形,直接量出它的振幅和周期,以此来计算相应的波阻抗和视电阻率。七十年代开始采用数字滤波方法来求取振幅谱,并引用最小二乘法求取阻抗张量元素。利用这种计算方法,而继续利用模拟记录的资料很不方便,通常采用数字磁带记录系统,并在电子计算机上进行资料整理工作。

大地电磁测深资料的反演解释工作,首先要求出实测视电阻率曲线所对应的地下介质电阻率分布模型,通常采用实测曲线和理论曲线进行对比的方法来完成,当实测曲线和某一理论曲线相吻合,理论曲线所对应的已知地电参数即为实测曲线的解释结果。为了尽快选择出与实测曲线一致的多层理论曲线,七十年代开始引用最优化法进行曲线的反演解释,完成了在电子计算机上对实测曲线进行自动拟合反演解释的研究工作。

二维介质实测曲线的反演解释工作,目前采用两种解释方法,其一是所谓“形式化”的解释方法,它用一维理论曲线对二维介质两电性主轴方位上的视电阻率曲线进行反演解释,二维介质的电性主轴指地质构造的走向和倾向。显然,这种解释方法是近似的,不够完善的。因为二维介质视电阻率曲线受到介质电阻率水平不均匀性的影响,造成视电阻率曲线畸变。为此,一些学者从事曲线畸变的研究,企图找出形式化解释方法可能出现的错误和相应的克服措施。另一种解释方法是直接用二维介质的理论曲线来作反演解释,但是,二维介质模型的参数选择具有多样性,正确地确定用于解释的介质模型和计算相应的理论曲线都比较困难。目前发展的趋势是将两种解释方法配合使用,要求对地质构造进行多点观测,先对每一点的实测曲线作形式化反演解释,把解释结果作为二维模型的选择依据,再用二维理论曲线对实测曲线进行反演解释。

大地电磁测深法具有一些明显的优点，它不需要人工场源，成本低廉，具有较大的勘探深度，不受高阻层的屏蔽影响，对低阻层有较高的分辨能力。目前已广泛地应用于深部构造的研究，石油和天然气的勘探，地热田的勘探，以及地震的预报和研究工作。

由于大地电磁测深法的勘探深度很容易达到100—200公里，方法已被广泛地应用于地壳和上地幔构造的研究。在国际地球物理年、地壳上地幔研究计划和地球动力学研究计划中，美国、苏联、加拿大和欧洲的一些国家都作了大量的大地电磁测深研究工作，发现在一些地质构造活动区的地壳和上地幔中，都有一个或几个相对的低阻层存在，其电阻率为十几欧姆米或几欧姆米，比起地表常见岩石的电阻率要低几个数量级。一般认为上地幔低阻层是由于地下岩石处于局部熔融状态引起的，壳内低阻层可能是由于岩石相变脱水，或局部含有裂隙水，或壳内岩石局部熔融引起的。值得指出，在上地幔低阻层隆起的地段和壳内低阻层发育的地区，地热流值普遍偏高，它可能反映岩石具有较高的温度和较低的电阻率之间的内在联系。据此，一些学者采用大地电磁测深法来研究区域地热场分布和进行地热田的勘探，并取得一些可喜的成果。由于大陆地区地热流的测量必须在钻孔中进行，利用深部岩石电阻率分布来研究地热场将是十分经济的。

鉴于大地电磁测深法在震区普遍发现壳内存在低阻层和上地幔低阻层的局部隆起现象，一些学者认为大震前震区地下岩石电阻率可能出现有百分之几十的相对变化，根据这些论点，已有一些国家设立了长期观测台，企图用大地电磁测深法来监视和预报地震。

此外，大地电磁测深法作为综合地球物理勘探方法之一，已成功地应用于石油和天然气田的勘探工作。它可以圈定沉积盆地基底的起伏，划分出沉积岩中不同的电性层，进行构造编图，确定石油远景区。一些学者认为在研究结晶基底起伏方面，它的精

度并不亚于人工地震勘探方法。

在我国，大地电磁测深法正在不断发展，六十年代曾试制成静磁原理的磁变仪，用它进行了方法的试验和研究。随后又研制出感应式光点模拟记录大地电磁测深仪和感应式数字磁带记录大地电磁测深仪。计算了一维模型的二层和三层理论曲线，完成了在电子计算机上进行资料整理和一维曲线自动反演解释的计算程序编辑工作，并在地震孕育和预报的研究工作中取得一些很有意义的成果。近年来，从事大地电磁测深工作的队伍日益扩大，理论研究不断深入，应用范围也日趋广泛。

# 第一章 地球的天然电磁场

地球的天然电磁场是大地电磁测深法观测研究的对象，它包含有各种不同的频谱成分，并以不同的形态出现。本章着重讨论地磁场信号的变化特点、分类、出现规律、振幅大小等，并对其成因机制作简要的论述。

## §1.1 天然电磁场的一般特性

天然电磁场的结构十分复杂，它随时间和空间位置都是变化的。对任一点地磁场的观测值进行统计分析和频谱分析，可以将它分为随时间相对稳定和相对变化的两部分。从量值上看，相对稳定部份是地磁场的主体，称为基本地磁场。基本地磁场空间分布规律和位于地球中心的磁偶极子场相当，它来源于地球内部。地磁场随时间变化部分包含有一系列的频谱成分，一般认为它来源于地球外部，和太阳的活动密切相关。大地电磁测深法以随时间变化的天然电磁场为场源。因此，我们将主要讨论各种频率的交变电磁场的分类，出现规律，振幅大小等问题。考虑到交变电场和磁场之间的伴生关系，讨论中我们只提及地磁场。

### 一、基本地磁场的空间分布

基本地磁场是相对稳定的，各种不同周期变化的地磁场和它相比都显得十分微弱。基本地磁场的空间分布和位于球心的磁偶极子场十分相似（图1-1），其特点是两极的地磁场方向近于直立（磁倾角 $I \approx 90^\circ$ ），垂直分量最大（ $Z \approx 0.6-0.7$ 奥斯特），水平分量最小（ $H \approx 0$ ）。赤道附近相反，地磁场方向在赤道附近近于水平（ $I \approx 0$ ），水平分量最大（ $H \approx 0.3-0.4$ 奥斯特），垂直分量最小（ $Z$

$\approx 0$ )。Z, H, I 分别表示地磁场的垂直分量, 水平分量和磁倾角, 统称地磁要素。地磁要素的等值线和地理纬线近于平行, 但地磁南北极和地理南北极并不重合, 表明地磁偶极子轴和地球自转轴之间存在一夹角。

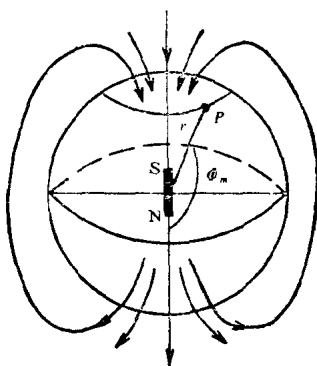


图1-1 地磁偶极子场示意图

1835年高斯对实测的地磁场空间分布进行球谐分析, 证明它一级近似地满足位于球心的磁偶极子场的关系式:

$$Z = \frac{2M}{r^3} \sin \Phi_m,$$

$$H = \frac{M}{r^3} \cos \Phi_m.$$

式中 $\Phi_m$ 称为地磁纬度,  $r$ 是测点到磁偶极子中心的距离,  $M$ 是磁偶极子的磁矩。

高斯的结论也说明了基本地磁场来源于地球的内部。另外, 基本地磁场也不是绝对不变的, 只是它的变化速度十分缓慢。对岩石剩余磁性的研究表明, 在漫长的地质年代中古地磁场曾出现过多次反转现象, 近代地磁测量也发现地磁南北极在缓慢的移动着。这种现象可能和深部物质的流动有关, 具体关系有待于进一步的研究和探讨。

## 二、地磁场的时间变化

地磁场随时间变化部分比较复杂，它包含一系列频谱成分，并可分为平静变化和干扰变化两大类。

平静变化的特点是经常出现，有一定的规律，并和行星之间相对运行的周期有明显的对应关系。属于平静变化的有太阳日变化( $S_d$ )、太阴日变化( $L$ )，朔望月变化( $M$ )，年变化( $A_n$ )，以及周期为11年和22年的变化等。

太阳日变化( $S_d$ )又称静日磁变化，它的周期为24小时，白天变化比较剧烈，晚上相对平静，变化幅度一般为30—40伽马(1伽马= $10^{-5}$ 奥斯特)。不同纬度的变幅不同，赤道可达200伽马，纬度超过 $60^\circ$ 的地区变化已十分微弱。静日变化还和季节有关，夏季变幅比冬季大(图1-2)。

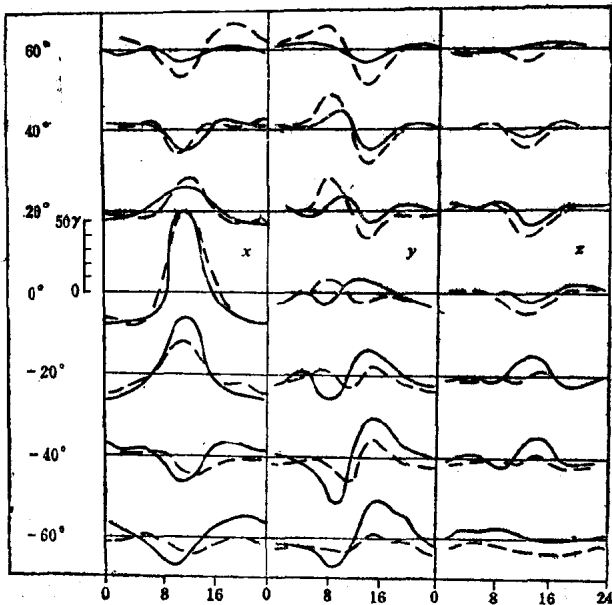


图1-2 冬至(实线)和夏至(虚线)时，不同纬度地磁场的日变化  
( $x$ ——北向分量； $y$ ——东向分量； $z$ ——垂直分量)



其他各种平静变化的周期较长，变化幅度较小，不属于大地电磁测深法应用之列，这里不一一介绍。

干扰变化与平静变化相比，它的出现带有一定的偶然性。按照干扰变化的形态特征，又可分为地磁脉动，磁湾，磁暴等，它们都和太阳的辐射有关，是大地电磁测深法的重要信号源。下面我们将专门讨论各种干扰变化的频谱特点和出现规律。

## §1.2 大地电磁场的变异

这里所介绍的大地电磁场变异包括地磁脉动、磁湾、磁暴等，它们都属于地磁场的干扰变化，与地磁场平静变化相比，它们的变化周期较短，而且它们的出现带有一定的偶然性。

### 一、地磁脉动( $P$ )

地磁脉动指具有正弦形或似正弦形的地磁场波动变化，它的周期一般为几秒到几百秒，通常的振幅为几十分之一伽马到几十伽马。按照波动变化形态上的差异，首先分为规则脉动( $P_c$ )和不规则脉动( $P_i$ )两大类，每一类又根据它们的周期范围再分为若干类型。1973年国际地磁学和空间物理学分会推荐一种详细的分类法，即所谓地磁脉动九类分类法，这是目前通用的分类法，如表1-1所列。

表1-1 地磁脉动分类表

类 型	$P_c$						$P_i$		
	$P_{c1}$	$P_{c2}$	$P_{c3}$	$P_{c4}$	$P_{c5}$	$P_{c6}$	$P_{i1}$	$P_{i2}$	$P_{i3}$
周期 (秒)	0.2—5	5—10	10—45	45—150	150—600	>600	1—40	40—150	>150

#### (一)规则脉动( $P_c$ )

规则脉动指具有连续正弦波形的地磁场变化，它的振幅稳定，波形规则，延续时间一般超过30分钟，有的可以长达数小时。规则脉动多出现在白天，并在地面一万公里范围内彼此相关，同时