



同济大学第二附属中学

No.2 Secondary School affiliated to Tongji University

同济二附中理工特色校本教材丛书

地球物理学勘探 技术应用

丛书主编 刘友霞

薛苗苗 编





同济大学第二附属中学

No.2 Secondary School affiliated to Tongji University

同济二附中理工特色校本教材丛书

地球物理学勘探 技术应用

丛书主编 刘友霞

薛苗苗 编

图书在版编目(CIP)数据

地球物理学勘探技术应用/薛苗苗编. —上海:
上海人民出版社, 2016
(同济二附中理工特色校本教材丛书/刘友霞主编)
ISBN 978-7-208-13588-8

I. ①地… II. ①薛… III. ①地球物理学勘探-高中-
教材 IV. ①G634.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 012137 号

责任编辑 罗 俊

封面设计 汪 昊

• 同济二附中理工特色校本教材丛书 •

刘友霞 主编

地球物理学勘探技术应用

薛苗苗 编

世纪出版集团

上海人民出版社出版

(200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co)

世纪出版集团发行中心发行 上海商务联西印刷有限公司印刷

开本 890×1240 1/16 印张 7.5 字数 130,000

2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-208-13588-8/G · 1777

定价 15.00 元

同济二附中理工特色校本教材丛书

主 编：刘友霞

顾 问：廖宗廷 王 群

分册编写：薛苗苗

编 委 会：金文娟 陆 杰 刘 洁

吴振华 李松浦

钱 君 沈红霞 方 艳

陆旻丰 薛苗苗

序

地球是人类赖以生存和发展的空间。地下蕴藏着社会发展所需要的各种矿产资源，为了使人类生活得更好，人类有责任和义务来保护地球，以改善我们的生存环境，并减轻和防治自然灾害。

人类有史以来就执着地对地球进行着探索，希望揭开地球内部的奥秘，渴望认识地球的起源及其演化。在世界科学的进步过程中，地质学家踏遍千山万水，从地球表面露出的岩石、矿坑中展布的地层来认识断层、褶皱和岩脉，确定其生成时代，推断构造运动，探究其发生、发展的历史。地质学家从野外实际观测出发，对积累起来的大量资料进行综合概括，运用理性思维寻求对地球的认识。而地球物理学是以地球为研究对象的一门应用物理学。物理学家在实验室的特殊条件下，对力、热、声、光、电、磁和放射性等物理现象进行实验和观测，探索其规律；而地球物理学家就是运用物理学的理论、方法和技术来认识地球，只不过是將物理实验从实验室搬到野外，在陆地、海洋直至空中进行数据采集，再对所采集的数据进行处理解释。

我国国民经济建设对地球科学，特别是对地球物理学有广泛的需求，当前一系列的重大问题。例如，发现更多的油气资源；对油气田开发进行监测，努力提高采收率；为适应机械化采煤而解决小断层、陷落柱、老窖水、瓦斯气以及采空区问题；勘探、开发煤层气，并加以利用；攻深找盲，寻找大矿富矿，以解决铜、金等固体矿产资源不足；寻找并开发地下水，特别是在老、少、边、穷地区；监测环境变化；预测并减轻自然灾害，包括洪水、地震以及旱涝、滑坡、泥石流等，都需要通过地球物理的方法技术进行解决，所以地球物理学有着极为广阔的发展前景。这对地球物理来说，既是一种机遇，也是一种挑战。

本书涉及的一些地球物理学基础知识，多半是与地质学问题密切相关的固体地球物理学基础知识及其应用。书中主要介绍了地震勘探、重力勘探、磁法勘探、电法勘探四种地球物理学勘探方法的基本原理与实际应用。由于本书的读者对象为高中生，作者用通俗易懂的方法简述了四种地球物理学勘探方法的基本原理，把本书的重点放在地球物理问题的实际应用方面。通过学习和实践，使学生学会多种地球物理勘探仪器的使用，并在此基础上开拓思维，开展一些有意义的创新性课题的研究，实现“培养学生利用所学知识解决生活中的问题的能力”的教学目标。

由于地球物理学是一门基于计算机、数学、物理等学科基础上的研究型学科，作者希望通过阅读本书，使中学生提早接触和了解科学研究的技术方法，培养和强化学生的实践能力和发现问题、解决问题的能力，激发学生对研究性学习的乐趣并实现与大学教育的初步接轨。

同济大学海洋与地球科学学院 于鹏

2015年11月于上海

前 言

地球物理学勘探是以岩（矿）石之间的物理性质的差异为基础，利用力、声、电、磁、光及核变等物理方法，通过专门的装置和先进的仪器以地球为测量对象，观测地球物理场的变化与分布，从而研究地下地质体（构造或矿体等）存在状态（产状、埋深、规模等），用于解决资源和能源的开发、工程水文地质问题的一门学科。

联系中学物理课本讲到的物理作用与物理场，我们可以将物理场分为：重力场、磁场、辐射场、电场、弹性波场等。所谓地球物理场，是用来描述地球内部及其周围的、具有物理作用的空间。在地球物理学中，物理场的对象是地球，所以地球重力场是指地球内部及其周围存在重力作用的空间；地球磁场是指地球具有磁力作用的空间，又称为地磁场；地球辐射场是指地球内部及其周围具有放射性作用的空间；地球电（磁）场是指地球内部及其周围具有电（磁）力作用的空间，又称为地电（磁）场；地球弹性波场则是指地球内部质点振动传播所涉及的空间。地球物理学勘探正是通过不同的物理作用测量方法，根据有别于整体地球物理场的局部异常场的分布特征进行地球内部组成的解释和推断。

在这样的背景下，本人希望通过《地球物理学勘探技术应用》校本教材的开发，使中学生可以提早接触和了解这一在我们生活中用途非常广泛的技术方法。培养和强化学生的实践能力和发现问题、解决问题的能力，激发学生对研究性学习的兴趣，并与大学学习接轨。本课程是一门基于计算机、数学、物理等学科基础上的研究型课程，基于课程内容要与学生生活紧密相连，本人选取工程地球物理勘探学科作为“地球探测实验室”的主要研究内容。课程主要面向已具备物理基础知识的高二年级学生。课程内容包括地震勘探、电法勘探、磁法勘探、重力勘探等工程地球物理勘探方法的学习。以应用为主，通过学习和实践，教会学生多种工程地球物理勘探仪器的使用，并在此基础上开拓思维，开展一些有意义的创新性课题的研究，实现“培养学生利用所学知识解决一些生活中的问题的能力”的教学目标。教学过程中采用“实践——理论——实践”的教学模式。

本书由薛苗苗编写，刘友霞主审。经过三轮修改，接受同济大学海洋与地球科学学院于鹏教授的专业指导，基本定稿。此外，本书在编写过程中得到了同济大学第二附属中学老师们的支持和关心，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免出现缺点和错误，欢迎读者批评指正。

同济大学第二附属中学 薛苗苗

2015 年 11 月于上海

目 录

第一章	绪论.....	1
1.1	地球物理学的研究对象	2
1.2	地球物理学的研究内容	4
1.3	地球物理学的研究方法	5
第二章	地震勘探.....	9
2.1	地震勘探基本理论	10
2.1.1	弹性波的分类	10
2.1.2	地震波的传播及其运动学特征	14
2.2	地震勘探技术	20
2.2.1	野外工作概述	20
2.2.2	地震波速度	23
2.2.3	地震解释技术	27
2.3	浅层地震勘探技术在探测公路采空区中的应用	28
第三章	电法勘探.....	33
3.1	电法勘探基本理论	34
3.1.1	岩石、矿石的电学性质	34
3.1.2	大地电场	37
3.2	电法勘探技术	42
3.2.1	电阻率法仪器与设备	43
3.2.2	电法勘探工作方法	45
3.2.3	数据处理	46
3.3	高密度电法在探测地下金属与非金属组合管线中的应用	47
第四章	磁法勘探.....	51
4.1	磁法勘探基本理论	53
4.1.1	磁学储备知识	53
4.1.2	地球磁场及岩（矿）石磁性	55
4.2	磁法勘探技术	59
4.2.1	磁力仪	59

4.2.2	磁测工作方法	60
4.2.3	数据处理	62
4.3	磁法勘探在检测某一地区磁场分布中的应用	63
第五章	重力勘探	69
5.1	重力勘探基本理论	70
5.1.1	重力及重力加速度	70
5.1.2	地球的正常重力及重力异常	72
5.2	重力勘探技术	75
5.2.1	重力勘探仪器与设备	76
5.2.2	重力勘探工作方法	77
5.2.3	数据处理	78
5.3	重力勘探在找矿及地震预报中的应用	81
5.3.1	重力勘探与找矿	81
5.3.2	重力勘探与地震灾难预报	83
第六章	综合地球物理勘探	87
6.1	地质—综合地球物理联合解释方法	88
6.1.1	综合地球物理解释的一般原则	88
6.1.2	综合地球物理联合解释技术	90
6.2	综合地球物理反演	93
6.2.1	综合地球物理独立反演	93
6.2.2	综合地球物理贯序反演	94
6.2.3	岩石物性约束联合反演	95
6.3	综合地球物理勘探在某电站选址地基勘察中的应用	96
6.3.1	地质概况与岩石物性	96
6.3.2	电性及速度特征分析	97
6.3.3	地质—综合地球物理定量解释	98
参考资料		100

第一章

绪论



第一章 绪论

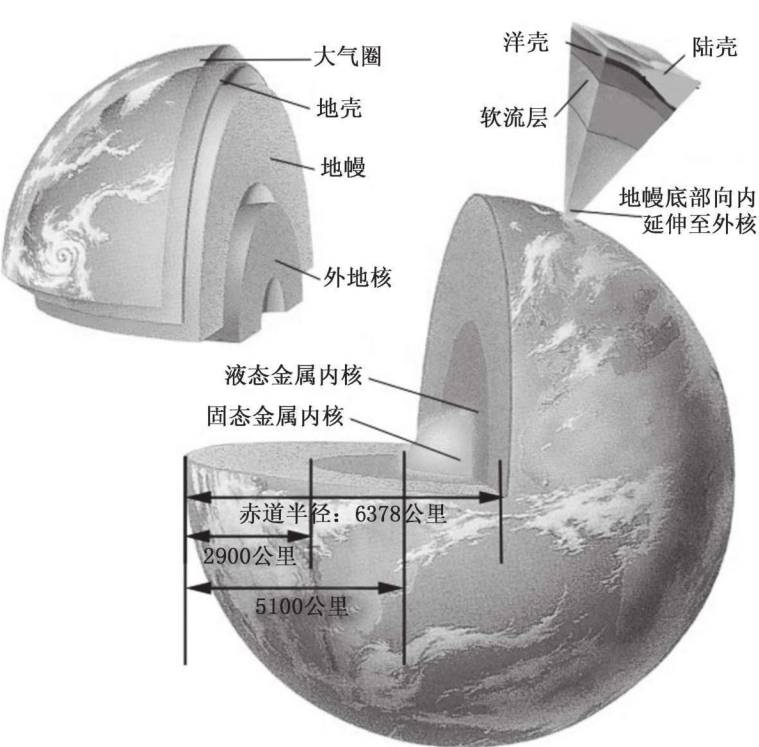
地球物理学是以地球为研究对象的一门现代应用物理学科。自 20 世纪初就已自成体系，随后地球物理学一词正式被采用，20 世纪 50 年代有了很大发展，进一步分为大气物理学、海洋物理学、空间物理学和固体地球物理学，是天文、物理、力学、数学、计算数学、化学和地质学之间的一门边缘学科。它在地球科学领域中占有极为重要的地位。

1.1 地球物理学研究对象

地球，人类的母亲，她是人类社会与经济生活的源泉。我们世代在她的怀抱里生活和成长，但是我们对地球了解甚少。为了对地球，特别是对地球内部物质组成、结构、深层物质运移过程有一个比较全面的了解，我们必须钻进地球深处去探索其奥秘，为人类进步与可持续发展作出贡献。

➤ 地球是人类赖以生存和繁衍生息及可持续发展的源泉

地球是人类赖以生存和繁衍生息以及可持续发展的源泉。地球上的各种物理条件，与人类的生存、生活和生产活动密切相关。地球表层的沉积沃土，为人类提供了居住和改造利用的场所；地下的石油、煤田和其他矿藏，为人类现代文明的发展提供了物质基础；近地表的大气层，为人类提供了空气；而远离地表的高空磁场，像一道天然防线，屏蔽了射向地球的高能带电粒子，保护了人类。



所；地下的石油、煤田和其他矿藏，为人类现代文明的发展提供了物质基础；近地表的大气层，为人类提供了空气；而远离地表的高空磁场，像一道天然防线，屏蔽了射向地球的高能带电粒子，保护了人类。

地球物理学中的许多重要的基础理论问题，都与地球深部的介质构造、物理性质、化学组成及其深层动力过程有关。例如，要了解构造运动和岩浆活动的过程就必须研究上地幔和下地壳的结构、化学性质和物理性质在纵向和横向的变化以及地幔低速层随地区及深度不同

图 1-1 地球圈层

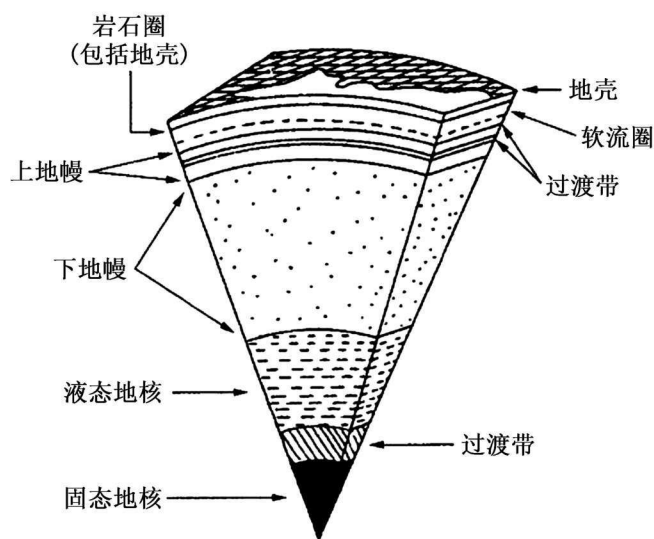


图 1-2 地球内部构造



图 1-3 大气物理学家赵九章

变化的原因。又如，地壳中有没有尖锐的界面，地壳中低速层、高速层存在的规律和成因如何？地壳与上地幔的成层性本质是什么？再如，成矿规律，变质作用，火山喷发，重、磁力异常，地热流的分布与地幔对流，地壳形变，大陆漂移，均衡补偿，海地扩张，板块运动，地震孕育与发生以及地球的物质状态等都与人类生活密切相关。这些问题的解决都必须对地球深部物理及深层过程进行深入的剖析。

► 地球又是给人类制造灾害的策源地

地球在给人类以恩惠的同时，也给人类带来种种灾难，地震的发生，火山的喷发等均来自地球内部，公元 79 年，一次火山熔流使意大利古城庞贝化为灰烬；1976 年 7 月 28 日发生在我国唐山的 7.8 级地震，仅几秒钟，使 99% 的房屋倒塌，24 万余人丧生，16 万余人受伤；2004 年 12 月 26 日，在印度洋发生的里氏 9.0 级的强烈地震引发海啸，给印尼、斯里兰卡、泰国、印度、马尔代夫等国造成巨大的人员伤亡和财产损失，10 多万人遇难，数百万灾民需要救助，在



图 1-4 2004 年印度洋海啸图

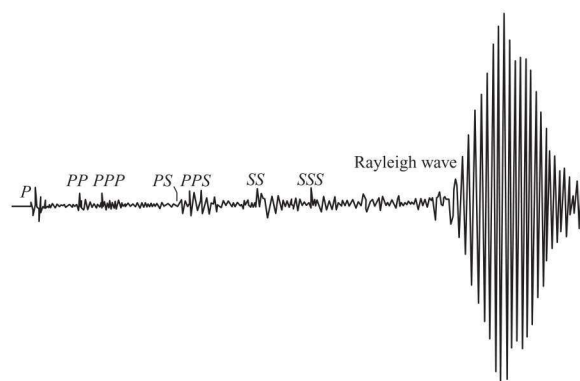


图 1-5 1983 年 4 月 3 日，哥斯达黎加地震在德国贝尔恩台记录的运动垂直分量

大自然面前，人类有时候显得如此脆弱，更需要对地球进行深入了解，地球物理学就是研究和认识地球的一门重要学科。地球物理学用物理学的原理和方法，对地球的各种物理场分布及其变化进行观测，探索地球本体及近地空间的介质结构、物质组成、形成和演化，研究与其相关的各种自然现象及其变化规律。在此基础上为灾害预报提供重要依据。已故著名地球物理学家赵九章先生是这样形容地球物理学的——“上穷碧落下黄泉，两处茫茫都不见。”

1.2 地球物理学的研究内容

地球物理学的研究内容总体上可以分为应用地球物理和理论地球物理两大类。应用地球物理（又称勘探地球物理）的研究范围比较广泛，主要包括能源勘探、金属与非金属勘探、环境与工程探测等。勘探地球物理学利用地球物理学发展起来的方法进行找矿、找油、工程和环境监测以及构造研究等，方法手段包括地震勘探、电法勘探、重力勘探、磁法勘探、地球物理测井和放射性勘探等，通过先进的地球物理测量仪器，测量来自地下的地球物理场信息，对测得的信息进行分析、处理、反演、解释，进而推测地下的结构构造和矿产分布。勘探地球物理学是石油、金属与非金属矿床、地下水资源及大型工程基址等的勘察及探测的主要学科。

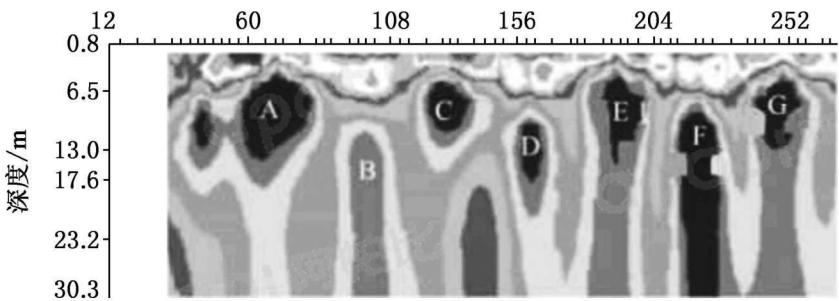


图 1-6 某垃圾填埋场高密度电阻率法检测剖面图

图 1-6 为某垃圾填埋场高密度电阻率检测的实例剖面，它就像一张医用 CT 片一样，清晰地呈现剖面地下深部的渗滤液渗漏状况。经现场对照核实，剖面图中显示的 7 个等间距低阻异常，与其下部掩埋的 7 只渗滤液汇集管道与总管的交汇点 A、B、C、D、E、F、G 一一对应。由于 7 个管道交汇点是由砖头砌成的，渗滤液已通过砖缝向外向下渗透，污染了周围的土壤。有的已向深部渗透，其中异常 B、F 两点向深部浸透较重。

理论地球物理研究对地球本体认识的理论与方法。例如，地球起源、内部圈层结构、地球年龄、地球自转与形状等，具体包括地震学、地磁学、地电学、地热学和重力学等。理论地球物理学通过地震波场和电磁波场探测发现了位于上地幔的软流层，为活动论的新的地球观提供了唯一站得住脚的理论依据；通过全球大地热流量的测量圈定了热的洋脊和冷的消减带，结合古地磁研

究结果和大洋中脊的条带状磁异常特征,为海底扩张和大陆漂移学说提供了令人信服的佐证;通过全球地震活动性和震源空间分布特征、全球重力、地磁和地热测量,为板块边界的划分提供了准确的依据;综合各种全球性的地球物理观测结果,对地球热状态、岩石圈热结构和流变性质提供了新的认识,为一直悬而未决的板块运动驱动机制问题的解决提供了新的依据。

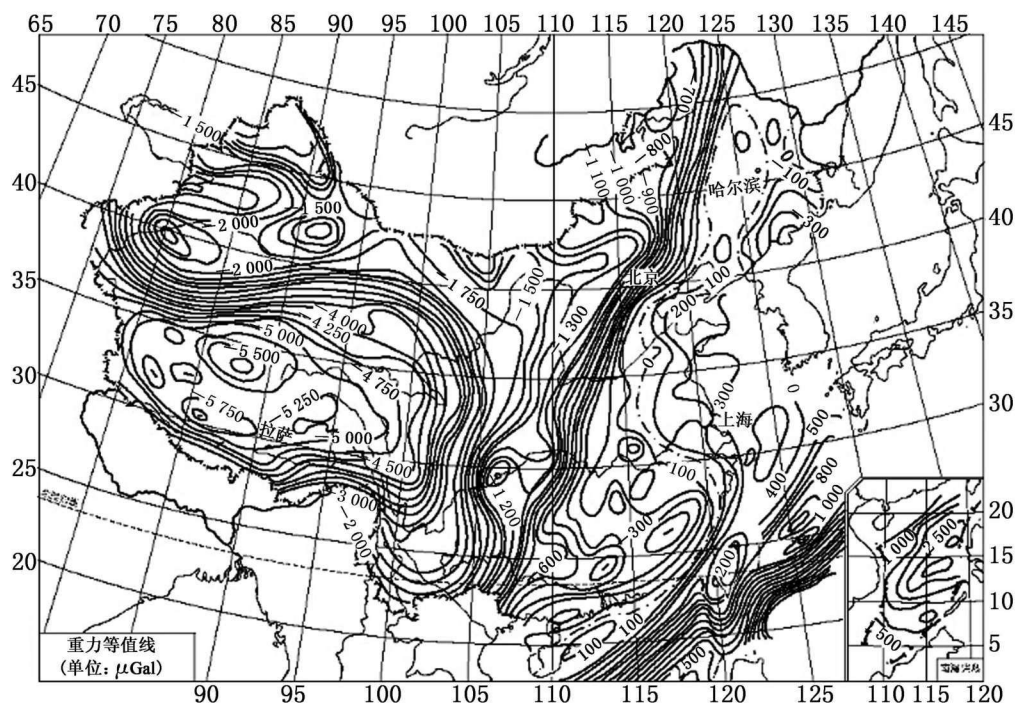


图 1-7 全国区域布格重力异常图

地球物理学是以地球为研究对象的现代应用物理学,在地球物理学天地里,既可以从事地磁场起源、地震发生机理等极富挑战性的研究,可以从事油气勘探、矿产勘探等关系到国家经济建设的应用性研究工作,也可以从事大气物理等交叉学科的研究工作。地球物理学专业培养出来的学生要掌握系统的数学物理基础理论和基本知识,有较强的计算机应用能力和较高的外语水平,具有扎实的地球物理专业知识和基本的实验技能,受过基础研究或应用研究的初步训练,具有较强的知识更新能力。

1.3 地球物理学研究方法

地球物理是地球科学中重要的基础学科。它的研究范围十分广阔,不仅涉及地球内部的地壳、地幔或岩石层、软流层与地核,也应包括地表以上的外部空间如大气层、电离层乃至宇宙外层所发生的各种物理现象、变化和过程。本书只论及固体地球部分,也称为固体地球物理。它是以地壳中各种岩石、矿石间的物理性质差异(如密度差 $\Delta\rho$ 、磁性差 $\Delta\gamma$ 、电性差 $\Delta\rho_k$ 、速

度差 ΔV 、波阻抗差 $\Delta \rho V$ 、放射性差异等) 为物质基础的, 利用物理学(力、声、光、热、电、磁、核变等) 的理论、方法和技术(表 1-1), 通过观测和研究因岩石、矿石物理性质差异而引起相应的地球物理场(如重力场、地磁场、电场等) 在空间上的局部变化(称为地球物理异常), 以认识地球及其结构、运动和各种动力学过程。

即便如此, 将固体地球作为一个整体, 它在时间上和空间上都是处于不断运动和发展之中的, 而不是静止的与固定不变的, 尽管地球内部发生过并进行着极为复杂的地质、物理和化学过程, 因此必须用系统论的观点分层次、分阶段地加深认识, 既要进行整体的、一般的、宏观的研究, 又要进行局部的、个别的、微观的研究, 既要进行地球物理观测处理和解释, 又要力求与地质学、地球化学的研究紧密结合起来, 相互交叉渗透以求得出更全面的认识。此外, 历史经验表明, 科学技术的发展及其与最新成果的研究紧密结合起来, 相互交叉渗透以求得出较全面的认识。此外, 历史经验表明, 科学技术的发展及其最新成就, 提供了认识地球并使之服务于人类的可能, 也促进了认识与服务的深化。

表 1-1 地球物理学方法分类表

地球物理 研究方法	重 力	磁 力	地 震	电 法	核技术	地 热
岩石物性参数	密度	磁化率、剩 余磁化强度	波阻抗、 速度	电阻率、介电常数、导磁率、 电化学活动性	放射性	热导率

在地球物理问题的研究中, 取得第一手的资料是十分关键的, 这是因为可靠信息与信息量的缺乏, 是任何数学技巧无法弥补的。这表明, 地球物理学在本质上是一门观测的学科。为此, 在地震波场、重力场、磁力场、电磁场、温度场以及地球自由振荡的观测中, 为取得可靠的、大量的有效信息, 就必须满足以下条件:

- 第一, 要有高密度、宽带、大动态范围、三分量记录的、自动化数字观测系统;
- 第二, 要有快速、高分辨率的先进软件包和数据库;
- 第三, 要有一支高素质的、责任心强的观测队伍, 并能取得第一手可靠数据;
- 第四, 要有与观测资料处理相匹配的物理与数值模拟系统。

基础数据不仅要确切可靠, 而且必须在较长时间内能妥为保存, 以便在发展中二次开发并经得起检查与核对。

地球物理勘探的理论基础是各种地球物理场的理论和正、反演计算及解释方法。重力勘探和磁力勘探基于位场理论, 电法勘探基于直流电场和电磁场理论, 地震勘探基于波场理论, 对这些理论和正、反演方法的研究是进行地球物理解释的基本条件。

地球物理勘探最重要的环节是对观测资料的处理和解释，消除和压制干扰和噪声，提取和增强有用信息是地球物理勘探资料处理的基础任务以及对处理后资料应用正、反演方法，结合地质等资料进行推断解释，得到相应的地质结论，是地球物理勘探的最终目的。

在任何一种地球物理方法中，对地球（地质体）进行观测，求得地球物理场，称为正演问题，而根据地球物理场来推断地球（地质体）结构、岩性描述和模型刻画，则称为反演问题。一般地说，地球物理方法都是从简化了的地球介质模型出发，研究其地球物理场的特征，再以此正演问题的理论值与观测结果的拟合（逼近）程度，反演地质体模型。这样，正演问题制约着反演问题的研究，而反演问题则归结为数学上的最优逼近问题，即逼近于简化了的地球介质模型。地球物理反演问题，在数学上大多数表现为不适定问题，即具有多解性。消除地球物理反演问题的多解性始终是地球物理的基本问题。

每一种地球物理方法只是从一种岩石物理性质的角度来看地质体，从而只能反映地质体的一个侧面。只有综合各种地球物理信息并与地质结合起来，才有可能逼近地质体的完整认识，从而对地球物理中的多解性问题进行约束。

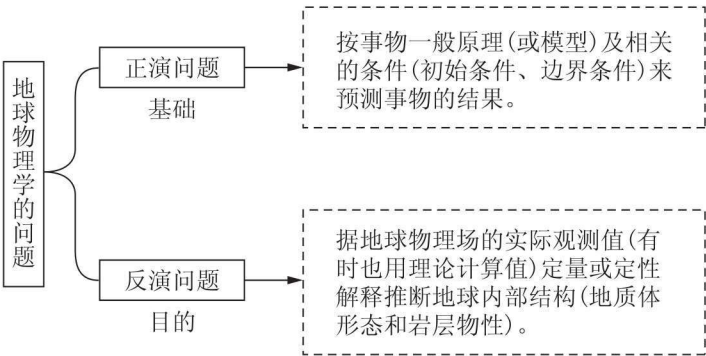


图 1-8 为江苏某地 MT 的偏移成像图。此图是结合所有能够收集到的地质、钻井及其他地球物理方法所取得的资料，并且包括 MT 与重力的野外实测数据、磁力资料 and 解释结果绘制的初始正演模型，图中显示在一套相对高阻背景下有一套低阻电性层。

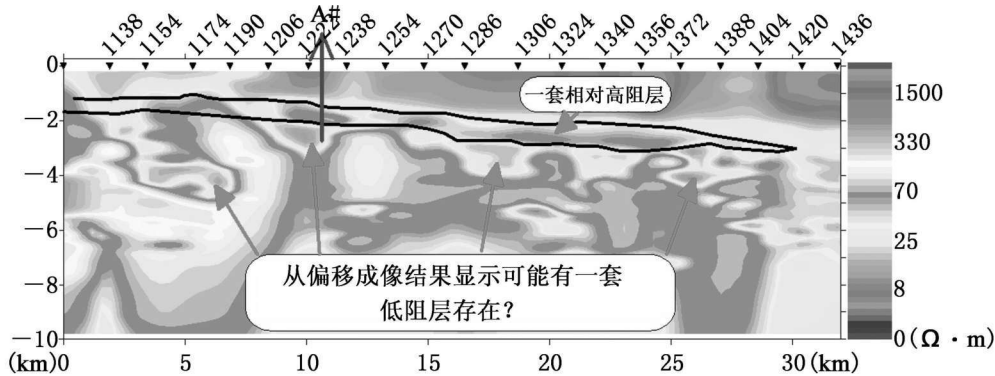


图 1-8 偏移成像反演结果（陈华根）

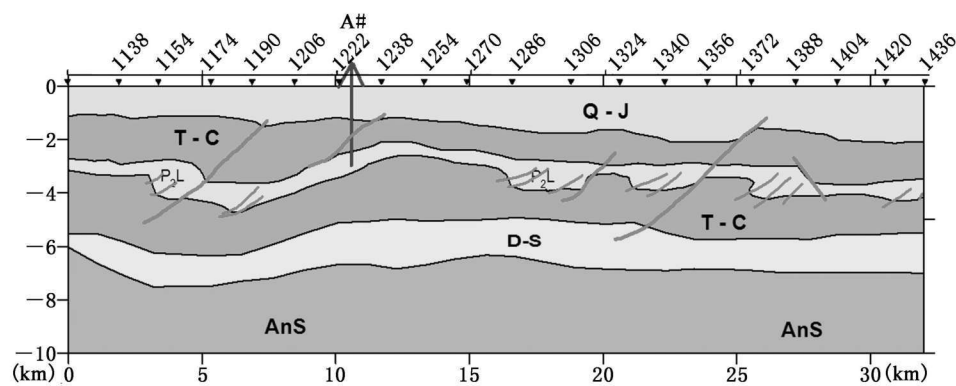


图 1-9 反演成果综合解释剖面图（陈华根）

图 1-9 为多种地球物理方法综合应用反演成果综合解释剖面图，经研究证实地下这套低阻层的存在，是生储油气的理想盖层。

第二章

地震勘探