



教育部高职高专资源勘查类专业教学指导委员会审查通过  
高职高专院校资源勘查类专业“十一五”规划教材

主 编：钱桂兰 张保康 屈建余

# 普通物探

PUTONG WUTAN



地 质 出 版 社



教育部高职高专资源勘查类专业教学指导委员会审查通过  
 高职高专院校资源勘查类专业“十一·五”规划教材

# 普通物探

主编：钱桂兰 张保康 屈建余

主审：樊宏伟

## （三）实习要求及思考题

- 1) 熟悉电法仪器的原理、面板结构及操作，学会使用仪器读取相关数据。
- 2) 测定并绘出低阻良导体上联合剖面  $\rho_s$  曲线，讨论其分布特征。
- 3) 测定并绘出高阻层上联合剖面  $\rho_s$  曲线，讨论其分布特征。
- 4) 测定并绘出低阻层上联合剖面  $\rho_s$  曲线，讨论其分布特征。
- 5) 编写实习报告。

## 三、重力场测量

### 1. 实习目的

了解石英弹簧重力仪简单原理，结构构造及工作原理。

### 2. 实习内容

训练学生安放电池，摆平仪器，打开开关读数的过程。

地质出版社

（京）图字01-97-116 ISBN 978-7-116-02323-3



即 出 版

# 高职高专院校资源勘查类专业“十一五”规划教材

## 编 委 会

主 任：桂和荣

副主任：王章俊

委 员：马艳平

马锁柱

刘 瑞

李 华

李立志

李军凯

陈洪冶

罗 刚

肖 松

辛国良

范吉钰

殷 瑛

徐耀鉴

徐汉南

夏敏全

韩运宴

靳宗菊

魏智如

## 编 写 院 校

长春工程学院

重庆科技学院

甘肃工业职业技术学院

湖北国土资源职业学院

湖南工程职业技术学院

河北地质职工大学

江西应用技术职业学院

吉林大学应用职业技术学院

云南国土资源职业学院

郑州工业贸易学校(郑州地校)

## 主 审 院 校

安徽理工大学

北方机电工业学校

河南理工大学

湖北国土资源职业学院

湖南工程职业技术学院

吉林大学应用职业技术学院

江西应用技术职业学院

昆明冶金高等专科学校

宿州学院

石家庄职业技术学院

太原理工大学

徐州建筑职业技术学院

云南国土资源职业学院

郑州工业贸易学校(郑州地校)



## 出版说明

最近几年,我国职业教育发展迅猛,地学职业教育取得了长足进展。由于历史原因,地学高职高专教育起步较晚,基础相对薄弱,迄今没有一套完整的专业教材。为此,2006年7月初,教育部高等学校高职高专资源勘查类专业教学指导委员会(简称“教指委”)会同地质出版社,组织全国分属地矿、冶金、石油、核工业部门的10所高职高专院校的一线优秀教师,联合编写了这套高职高专资源勘查类专业教材。教材编写从地学高职高专教育的教学实际需要出发,内容安排以理论够用,注重实践为原则;编写体例有所创新,章前有引导性内容,章后给出了重点内容提示及本章的复习思考题。

首批编写的教材共22种,包括:《普通地质学》、《地质学基础》、《岩石学》、《矿物学基础》、《古生物地史学》、《构造地质学》、《地貌学及第四纪地质学基础》、《矿床学》、《固体矿产勘查技术》、《普通物探》、《地球化学探矿》、《水文地质学概论》、《专门水文地质学》、《钻探工程》、《钻探设备》、《土力学地基基础》、《工程岩土学》、《岩土工程勘察》、《地质灾害调查与评价》、《宝石学基础》、《宝石鉴定》、《测量技术》。这些教材从2007年6月开始,陆续由地质出版社出版。

为了保证教材编写出版的顺利进行,确保教材的编写质量,本套教材从编写立项开始就成立了教材编写委员会。由教指委主任、宿州学院院长、博士生导师桂和荣教授任编委会主任,地质出版社副社长王章俊编审任编委会副主任。

教材编写过程中,参编教师投入了大量的心血和精力。多数教材融入了主编们近年来的教学及科研成果,从而使本套教材具有较强的时代感和较好的实用性。还要特别指出的是,教材的第一主编承担了编写大纲的制定、分工、统稿、修改、定稿等工作,为教材的顺利出版作出了重要贡献。各参编院校的领导从大局出发,给予每位作者最大限度的支持,保证了本套教材的按时出版。

教材建设是教指委的职能之一。本套教材在编写过程中,教指委一直发挥着管理与协调作用。2007年4月底,教指委组织14所院校的专家在北京召开了教材评审会议。与会专家会前对书稿做了认真审读,对教材初稿给予了较高评价,同时,指出了存在的问题和不足,并提出了具体的修改建议。会议结束后,作者根据评审意见对教材做了进一步的修改和完善。

作为本套教材的出版单位——地质出版社感谢教指委和各位作者对我们的信任和支持!精品教材的诞生需要多方努力,反复锤炼。为了使本套教材日臻完善,成为高职高专资源勘查类专业的精品教材,希望广大师生在使用过程中,注意收集各方意见和建议,并反映给教指委或地质出版社,以便修订时参考。

地质出版社

2007年7月

# 前 言

2006年7月，教育部高等学校高职高专资源勘查类专业教学指导委员会、地质出版社组织10所地矿类高职高专院校，在河南省郑州市召开了全国资源勘查类、地质工程与技术类专业高职高专教材编写研讨会。会议决定，由吉林大学应用技术学院钱桂兰、湖南工程职业技术学院张保康、甘肃工业职业技术学院屈建余共同编写《普通物探》教材，以满足各校地质调查与找矿专业、水文地质专业的教学需要；教材内容按70学时设计。

编者在国内没有同类专科教材的情况下，认真研究了10所院校的现行课程教学大纲，反复对比了各类本科教材，针对高职高专院校学生的培养目标和特点，制定了教材编写大纲。

本教材充分考虑了地质调查与找矿专业和水文地质专业对物探方法的不同要求，重点强调用物探方法解决地质问题的有效性，要求学生熟悉各种物探图件的作用和用途，利用物探资料解决地质问题的方法。本教材以磁法勘探、重力勘探、电法勘探为重点。在重点内容选材上则侧重物探结果的分析，而对具体的工作方法，考虑到地质、水文专业学生不直接从事物探工作，因此尽力压缩。关于各种方法的原理部分，以能说清楚该方法的物理实质为准，尽量避免公式的繁琐推导，而以定性说明为主。

全书由吉林大学应用技术学院钱桂兰主编。编写分工为：第一章由四川音乐学院绵阳艺术学院王楠编写；第二章由张保康编写；第三章由湖南工程职业技术学院谢湘雄编写，第四章由钱桂兰、王庆周（郑州工业贸易学校）共同编写；第五章、第六章由屈建余编写；第七章由吉林大学应用技术学院王喜春编写；前言由吉林大学应用技术学院任东辉执



# 目 次

## 前 言

第一章 概述	(1)
第一节 地球物理勘探在资源勘查中的作用和地位	(2)
第二节 地球物理勘探面临的任务、问题和发展趋势	(3)
一、地球物理勘探面临的任务	(3)
二、地球物理勘探技术面临的问题与发展趋势	(5)
第二章 磁法勘探	(9)
第一节 理论基础	(9)
一、磁场、磁场强度及其单位	(9)
二、地磁场、地磁要素、地磁图、地磁场随空间及时间的变化	(11)
三、磁异常	(14)
四、物质的磁化、磁化强度和磁化率、岩石的磁性	(14)
第二节 磁力仪、工作方法和成果图示	(17)
一、常用磁力仪名称及其所测量的物理量	(17)
二、悬丝式垂直磁力仪基本工作原理	(17)
三、CZM-3 质子磁力仪工作原理简介	(19)
四、磁法勘探的野外工作方法	(20)
五、地面磁测成果的图示	(22)
第三节 磁法勘探应用实例	(24)
一、应用实例	(24)
二、小结	(26)
第四节 磁法勘探的新技术	(27)
一、微磁测量	(27)
二、磁卫星测量	(27)
第三章 重力勘探	(29)
第一节 重力勘探的理论基础	(30)
一、有关重力勘探的地球基本知识	(30)
二、地球的重力和重力场	(31)
三、重力异常	(33)
四、岩石密度及其测定	(35)
第二节 重力勘探仪器、观测方法及资料整理	(36)
一、重力勘探的仪器	(36)
二、重力勘探的野外工作方法	(40)
三、观测结果的整理	(42)
四、重力异常总均方误差的讨论	(48)
五、重力异常的图示	(49)
第三节 重力勘探资料的实际应用	(50)



一、重力异常在研究地壳深部构造及地壳均衡中的作用 .....	(50)
二、重力勘探的应用 .....	(52)
第四节 重力勘探新技术 .....	(52)
一、海洋重力测量 .....	(52)
二、航空重力测量 .....	(52)
三、地下重力测量 .....	(53)
<b>第四章 电法勘探</b> .....	(55)
第一节 电阻率法的理论基础 .....	(55)
一、电阻率法的基本原理 .....	(56)
二、勘探深度与供电电极距的关系 .....	(62)
三、视电阻率及电阻率法的物理实质 .....	(63)
第二节 电阻率法 .....	(65)
一、电阻率剖面法 .....	(65)
二、电阻率剖面法的野外工作方法 .....	(75)
三、电阻率测深法 .....	(83)
四、电阻率法的仪器 .....	(100)
五、电阻率法的装备 .....	(102)
第三节 充电法 .....	(103)
一、充电法的基本原理 .....	(103)
二、电位及电位梯度曲线 .....	(104)
三、充电法的野外观测方法 .....	(105)
四、充电法的应用 .....	(105)
第四节 自然电场法 .....	(108)
一、自然电场形成的原因 .....	(108)
二、自然电场法的应用 .....	(109)
第五节 激发极化法 .....	(112)
一、直流激发极化法的基本原理 .....	(113)
二、各种电极装置 $\eta_s$ 曲线的基本特征 .....	(114)
三、直流激发极化法的应用 .....	(117)
第六节 电法勘探新技术 .....	(123)
一、瞬变电磁测深法 .....	(123)
二、探地雷达法 .....	(124)
<b>第五章 地震勘探</b> .....	(134)
第一节 弹性介质与地震波 .....	(134)
一、弹性介质的特征 .....	(134)
二、弹性介质中地震波的类型 .....	(135)
三、影响地震波传播速度的主要因素 .....	(136)
第二节 折射波法和反射波法 .....	(137)
一、折射波法 .....	(137)
二、反射波法 .....	(138)
三、地震勘探数据的采集 .....	(140)
四、地震勘探资料处理 .....	(145)
第三节 地震勘探新技术 .....	(152)

一、地震地层学	(152)
二、三维地震勘探	(153)
三、高分辨率地震勘探	(156)
四、垂直地震剖面	(157)
五、横波地震勘探	(159)
六、层析成像技术	(160)
<b>第六章 放射性探测</b>	(164)
<b>第一节 放射性探测的基本知识</b>	(164)
一、岩、矿石的放射性	(164)
二、射线与物质的相互作用	(166)
三、核辐射测量常用的量及单位	(167)
四、放射性核素在自然界中的分布	(168)
五、放射性元素的迁移	(169)
六、铀矿产概况	(170)
<b>第二节 放射性测量方法及其应用</b>	(170)
一、 $\gamma$ 测量和 $\gamma$ 能谱测量	(171)
二、 $\alpha$ 法	(174)
三、放射性物探的应用	(176)
<b>第三节 放射性测井</b>	(180)
一、自然 $\gamma$ 测井	(180)
二、 $\gamma$ - $\gamma$ 测井	(181)
三、中子测井	(182)
<b>第七章 物探方法的综合应用</b>	(185)
<b>第一节 物探方法在金属矿床上的应用</b>	(185)
一、罗河铁矿	(185)
二、中关铁矿	(188)
三、丁家山多金属硫化矿	(189)
四、风化壳外生矿床	(191)
<b>第二节 物探方法在非金属矿床上的应用</b>	(193)
一、金刚石矿床	(193)
二、盐类矿床	(196)
<b>第三节 物探方法在地质填图中的应用</b>	(196)
一、确定接触带	(196)
二、圈定火成岩体	(197)
三、确定断裂带	(197)
<b>附 录</b>	(200)
<b>参考文献</b>	(202)

# 第一章 概述

## 内容介绍与学习目的

本章主要介绍地球物理勘探在资源勘查中的作用和地位，地球物理勘探面临的任务、问题和发展趋势。了解地球物理的背景、特点、前景及各分支方法。

社会文明的进步，在很大程度上是以地球资源的开发利用为基础的，因此资源勘探、开发和利用的水平，是反映社会发展的一个重要标志。科学技术的发展是社会经济发展的客观需求，同时科学技术的进步又反过来推动社会的发展。进入 20 世纪以来，人类对能源和矿产资源的需求与日俱增，勘探与开发的规模越来越大，那些容易找到的资源多数已被发现并开采，传统找矿方法面临越来越大的困难。

面对这些挑战，人们不得不去探求新的、能够从地面观测到反映地下地质信息的勘探技术。物理学的进展、关于物质性质的一些新发现，以及观测技术的进步，为新方法的产生提供了条件。20 世纪初，一个地质学与物理学的边缘学科——地球物理勘探逐渐形成。普通物探亦称地球物理勘探，简称物探，是通过观测由地下探测对象与周围介质物理性质的差异所引起的物理场变化，来研究探测对象的形态和性质。目前，已利用的物理性质包括密度、磁性、电性、弹性、热性和放射性等，与其相应的物探方法有重力勘探、磁法勘探、电法勘探、地震勘探、地热勘探和放射性勘探。根据工作空间位置的不同，地球物理勘探可划分为地面、海洋、航空和钻井物探等；按照勘探对象的不同，可划分为金属与非金属、石油与天然气、煤、水文、工程与环境物探等。

物探是利用专门的仪器在预先布置好的测线上测量各种物理场的局部变化，我们称这种变化为地球物理异常，物探就是通过对异常性质及其变化规律的分析与研究来找矿或解决其他地质问题的。

从物探技术所包括的三部分内容，即数据采集、处理和解释来看，它属于信息科学的范畴。它的整个发展过程，一方面体现在：不断改进仪器性能和观测技术，以提高数据采集精度；不断改进数据处理方法，以消除各种影响因素；针对不同研究对象不断优化地球物理方法组合，以得到正确的地质解释。另一方面是研究利用新的物理参数，以扩大信息来源。因此可以看出，地球物理勘探技术的发展，是和相关科学技术的发展息息相关的。电子技术和计算机技术的进步带动了地球物理勘探数据采集技术的进步。以地震勘探为例，从最初的模拟照相记录，经模拟磁带记录，发展到数字记录，使得数据采集的精度大大提高，动态范围扩大。目前，大多数地球物理仪器实现了数字化和自动化，地球物理测井仪器甚至实现了程控化。同样，在数据处理和资料解释以及成果显示中，也广泛地采用了计算机技术的最新成果，并且随着数学和计算方法的进展，对地质现象的地球物理正演模拟，以及由观测的地球物理场反演地下地质结构和参数分布时，不仅广泛采用数理方程反演方法，而且采用分形分维、人工神经网络、混沌理论等多种非线性算法，使得地质过



程和现象的描述更贴近实际，由可视化技术给出的结果更具有明确的地质含义。

## 第一节 地球物理勘探在资源勘查中的作用和地位

地球物理勘探在 20 世纪后半叶已经形成了比较完整的体系，成为地质勘探中一个不可缺少的组成部分，目前在石油、天然气、煤、金属与非金属以及水等资源勘探的各个阶段，都发挥着重要作用。

地球物理勘探是地学研究的一个手段，同时也是地学研究的一项基本内容。

由于在不同找矿阶段的目标物是不同的，因此地球物理勘探技术方法的选择，也应与之相适应，才能有效地发挥不同方法的作用。不同地球物理方法由于所利用的物理参数不同，所探测的范围和分辨率也不同，因此，合理选择综合地球物理勘探方法，是布置地球物理勘探工程必须遵循的原则之一。

大面积区域地球物理调查，主要采用航空物探和重力勘探。我国航空物探始于 1959 年，主要方法为航空磁测和航空放射性测量。到 1999 年底，全国航空磁测覆盖面积达  $1144 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，航空放射性测量覆盖面积达  $300 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，并编制了全国 1:400 万和 1:500 万航磁和航放图。另外各省区或跨省区还编制了 1:50 万到 1:100 万比例尺航磁和航放图，以及对一些找矿远景区编制了 1:5 万到 1:20 万的比例尺航空物探图件。区域重力测量已基本覆盖了我国陆地的大部分，编制了不同比例尺的全国和区域性重力图件（孙文珂等，1992，1997）。

在基础地质研究、填图和矿产预测工作中，根据区域地球物理测量结果得到了许多新的认识和见解。利用 1:20 万 ~ 1:50 万的重力和磁测资料，能够清楚地圈定构造线及断裂位置。例如，郯庐断裂、扬子地台和华南褶皱系的界线，都是依据重、磁资料揭示或加以修正的。重、磁资料在圈定与沉积矿产有关的沉积盆地以及研究盆地基底性质和起伏方面，也有很好的效果。大比例尺航磁、航电、航放和遥感相结合，对于圈定火成岩体，追索矿化带，指出找矿远景区，个别情况给出普查靶区，都有许多成功的实例。

在矿产普查勘探阶段，物探工作涉及到的黑色金属矿、有色金属矿、贵金属矿、稀有稀土矿与分散元素矿以及非金属矿，达到 40 余种，取得的成果十分丰富。

油气普查与勘探的阶段划分，虽然不同国家并不相同，但基本思路是一致的。第一阶段是由大区域勘探结果优选出可能的含油气盆地，然后对这些盆地进行勘探，识别出含油气系统，划分出有利含油气带。这个阶段采用的主要地球物理方法是重力、航磁、电测深和地震概查，以及少量参数井中的地球物理测井。第二阶段的目的是从有利区带中划分出圈闭，采用的主要物探方法为二维、三维反射地震勘探，以及预探井中的地球物理测井。第三阶段则是对已获得工业油气流的圈闭进行评价勘探，提交控制储量和探明储量，这个阶段的主要物探工作是地震精查，并结合地球物理测井进行油气藏描述。当然，依据油气藏的复杂程度不同，采用的技术方法也不尽相同。

上述讨论可以看出，地球物理勘探在资源勘查中发挥着重要作用。同时，物探人员在地球物理勘探工作部署、数据解释、查证异常等方面积累了许多宝贵的经验和教训。



## 第二节 地球物理勘探面临的任务、问题和发展趋势

在新中国成立后的半个世纪中,我国地球物理工作在资源勘探中发挥了巨大的作用,取得了举世瞩目的成绩。圈出了数以百计的油气构造及油气田,勘查出数以千计的金属与非金属矿的矿产地,完成了数以万计的水源地和工程环境项目,为基础地质与深部地质研究提供了许多新的证据与认识(地矿部勘查技术司,1992)。在技术方面,已形成了针对石油、天然气、固体矿产、水和地热等的地球物理勘探方法系列。但是,我国目前处于经济迅速发展阶段,资源的需求与供给的矛盾日益突出。新增储量赶不上消耗的速度,预计到2010年石油、天然气、富铁、铬、贵金属、钾盐等45种主要矿产中近一半矿种的保有储量将不能满足需求。在新一轮地质调查和找矿勘探工作中,面临的将是隐伏的、地质条件复杂的、用常规方法难以认识的对象。这对于地球物理探测方法既是严峻的挑战,同时也提供了发展机遇。

### 一、地球物理勘探面临的任务

#### 1. 基础地质调查

基础地质调查是提供国家地质状况的基本信息,以及经济建设和社会可持续发展所需基础资料的一项重要工作。基础地质调查的成果在能源、矿产资源、水资源和其他自然资源勘探中有着广泛用途。我国陆地全面的地质调查工作起步于20世纪50年代。一些成果,由于受当时技术水平和条件的限制,区域地球物理参数偏少,精度偏低,成果表现形式单一,并有不少空白,已经远远不能满足新形势下的需求。

我国正在进行的新一轮国土资源大调查,其中基础地质调查占有重要位置,并强调基础地质填图与地质科学研究紧密结合,强调多学科、多手段进行重大地学基础理论和经济技术综合评价研究,探索区域地质调查和地学研究紧密结合的创新体系。因此加大遥感、航空物探、高精度重力测量等地球物理工作,以及GIS在区域地质调查中的应用,有着重要意义。特别是在覆盖区和交通不便的广大西部地区,地球物理勘探将发挥重要作用。

地球物理探测方法涉及电、磁、密度、声、核、热等多种物理性质,包括的地质信息极为丰富;工作空间广阔,包括陆地、海洋、空中和井下;服务领域宽广。因此,地球物理探测是资源调查的重要技术保证之一,也是“数字国土”工程的主要数据源之一。充分利用现代计算机技术的最新成果,建立科学的数据管理系统,将为三维地质填图创造条件。

#### 2. 固体矿产勘查

固体矿产地球物理勘查工作,将主要围绕铜等有色金属、铀、金、银矿和一些非金属矿开展工作。边远地区,尤其我国西部是发现新的矿产基地的主要目标区。在东部矿业发达地区急需寻找矿山的接替资源。物探在快速发现新矿产地、扩大矿区储量、寻找盲矿和解决矿山地质中的各类问题将大有可为。自20世纪80年代初以来,通过地球物理、地球化学方法共发现物化探异常7.2万处,其中已检查的异常2.5万处,验证5600处,见矿3200处,发现大、中、小型矿床817处,取得了突出效果,但仍有4.7万处尚未检查验证。因此,运用综合手段,快速准确筛选各类异常,进行矿产资源远景评价和潜力评估,

并部署综合地球物理方法进行各类异常的查证和对矿点、矿化点调查评价是一紧迫的任务。

为了顺利完成发现新矿产地的任务，一方面需要进一步完善和改进现有的地球物理方法技术，同时要研究开发新方法和新技术。

### 3. 石油与天然气勘查

我国石油、天然气的勘探与开发后备基地严重不足，自1993年开始我国已成为石油净进口国。油气资源已成为影响经济和国防安全的重要因素。东部各油田多数已进入开发后期，一方面需要加强开发地球物理工作，以提高油气的采收率，另一方面则要加强深部和外围油气藏勘探。勘探中面对的将是一些构造复杂和岩性复杂的油气藏，如薄互层油气藏、火成岩裂缝油气藏和古潜山油气藏等，需要地球物理工作在理论、方法和技术上有新的突破。

我国西部是油气资源潜力巨大的地区，但是研究程度还很低，需要投入大量的工作。我国煤层气资源的潜力还有待深入研究和评价。

### 4. 地下水资源勘查

我国水资源面临着严峻的形势，许多地区存在城市供水和农业用水不足的问题，特别是西部地区的水资源状况已成为实现我国经济发展战略西移、促进西部经济发展和社会发展的重要前提。因此，西北干旱地区和西南岩溶石山缺水地区的地下水勘探工作，将是一项突出的任务。我国西北地区，包括内蒙古西部，面积达 $3.7 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，是我国主要干旱、半干旱的荒漠、黄土高原和沙漠分布区，生态环境极其脆弱，水资源极其短缺。为进一步查明西北地区地下水资源总体潜力，并有所突破，应该发挥航空物探、遥感，以及电磁法为主的综合物探的作用。

西南岩溶石山地区系指分布于滇、黔、桂、川、湘、粤、鄂七省区的联片裸露岩溶区，面积约 $54 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该地区地形崎岖，山高水深，水土流失严重，地表水严重漏失，渗入地下深处。在这类地区，地下水的勘探，主要是以综合物探技术为先导，勘查岩溶发育特征与岩溶地区地下水赋存规律。

### 5. 海洋矿产资源调查

我国海域面积为 $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，大陆海岸线长达18000 km，海岛6500多个，大陆架总面积 $1.36 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，沿海滩涂面积约 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是一个名副其实的海洋大国。海洋中蕴藏着非常丰富的矿产资源，如石油、天然气、天然气水合物、滨海砂矿、多金属结核、富钴结壳和热液硫化物矿产等，具有重要的战略意义和巨大的经济价值。海洋资源可以在相当程度上弥补陆地资源的不足。海洋资源地球物理调查已成为我国高技术发展领域的重要内容（刘光鼎，1997）。

### 6. 地热资源勘查

根据我国地热资源的特点，既要继续加强西藏云南一带高温地热能源的勘探、开发和利用，同时要对广阔的具有隐伏地热资源潜力的广大平原地区加大勘探力度。虽然这些地区的热源大多数属于中低温地热资源，但分布广泛，其利用价值并不亚于高温地热发电。中低温地热资源的非电直接利用，不仅具有重要的经济价值，而且具有良好的环境保护效应。

## 二、地球物理勘探技术面临的问题与发展趋势

随着勘探领域的扩大与深入,遇到的地质条件越来越复杂,地球物理勘探将面临多种多样的问题。其中主要问题可以概括为以下3个方面,今后的发展也将围绕克服这些问题而开展。

### 1. 提高微弱地球物理信号的采集与处理水平

地球物理勘探技术是依据对观测的地球物理场数据的分析来实现探测目的的。因此,数据采集是地球物理工作的基础。历史的发展充分说明,数据采集精度的提高,使得地球物理探测的应用效果、应用范围不断扩大。例如重力仪的精度从20世纪50年代的 $(0.2 \sim 0.4) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 提高到目前的 $(0.01 \sim 0.03) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,使得重力勘探的能力和范围大大加强和拓宽。地球物理方法和理论的进展,需要数据采集技术的进步作保证才能得以实现。世界上所有地球物理技术发达的国家,都有强大的仪器研究与制造业做后盾。为了使我国地球物理工作的发展居于世界先进水平,也必然要加强仪器的研制。

其中包括:①高性能探测换能器的研制,如新型地震检波器和核射线探测器等;②高性能人工源的研制,在地球物理方法中,除观测重力场和磁场等天然场的方法之外,有许多是借助人工场激发的物理场进行的,如地震勘探和大部分电法勘探,为了获得更多的地质信息,场源往往起很大作用,因此,各种场源的研究,也会是今后发展的一个重要方面,如高性能的震源、大功率的电源、高产额的射线源等;③高性能数据记录系统的研制,随着方法的进步,数据量的加大,要求记录系统有更高的性能,例如三维地震和高密度电法,都要求仪器的道数增加。为了提高探测的分辨率,则要求记录系统的带宽和动态范围加大等。

地球物理数据处理的目的是消除各种干扰因素,突出所需的地质信息。这些干扰因素包括:与测量技术有关的影响因素、环境影响因素以及非研究目标的其他地质因素的影响等。不同地球物理方法,受各种因素的影响程度不同,因而处理的重点和方法也不相同。以地震勘探为例,为了提高数据的精度,需要消除近地表因素对一致性的影响;为了有效地提高分辨率,需要进行提高信噪比处理;在反射倾角比较大时,为了减少空间假频,需要进行道内插处理;为了提高解释精度,需要进行提高地震数据的保真处理等。

### 2. 非均匀地质体的探测与描述

几何形体简单、物性分布均匀、埋藏深度较浅且易于发现的矿产资源,今后将越来越少,物探人员面对的将是岩性不均匀、结构与构造复杂、物理性质在纵向和横向上均有较大变化,并且埋藏较深、地质条件复杂的勘探对象。为了查明空间上不均匀变化的对象,必须获得足够的能表征地下内部结构和性质的参数,才有可能比较细致地勾画出对象的复杂特征。所谓足够的参数,一是指参数的种类,二是指每种参数的数量。为了清晰显示研究对象的空间特征,近20年来各种物理场的成像研究取得很大进展,包括地震波成像、电磁波成像和位场成像等。

地震波成像可以在地面、井间和井地之间进行。在已知速度的情况下可以进行几何结构成像,或已知几何结构的情况下进行物性结构成像。地震波成像在石油天然气勘探中已取得一些实用的效果,其中突出的实例如利用叠前深度偏移清楚地获得了古潜山的内幕(杨长春等,1996),但是目前地震勘探实际观测的主要还是纵波的垂直分量,多波多分



量的观测与应用研究还只是开始。另外，实际地下介质不仅具有纵向和横向的不均匀性，而且具有纵向横向的各向异性。只有充分地利用地震波的多种信息，才能够对岩性变化、裂隙的发育状况和孔隙中流体的性质有更准确的了解。井向地震波层析成像比地面地震的分辨率高，随着井下设备的发展，将成为开发地震的重要工具。单井地震波成像即保持井下地震波不受表层干扰的优点，同时不受需要两口井的限制，有可能得到较大发展。超声波井壁成像是成像技术在油田勘探中的另一项重要应用，它可以划分裂缝发育层段，从而有效地圈定裂缝储层，目前它的分辨率还比较低，定量解释技术有待开发。

电磁波成像包括低频的电磁感应法和大地电磁测深，以及高频的探地雷达成像等。电磁波成像也可以在地面、井下、井间或井地间进行。相对于地震波成像，电磁波成像的方法理论和技术还处于发展的初始阶段，许多地方沿用了地震波成像的方法技术。但是由于描述电磁波传播过程的方程中含有扩散项，且其传播常数为复数，因此采用地震波成像方法和技术处理电磁波成像问题，往往得不到理想的效果。目前，低频电磁波成像的应用还处于萌芽阶段（何继善 1997），因此，电磁波成像的进一步发展，必须根据自身的特点探索新的路子。

由于高频电磁波方程可以简化为类似于弹性波的波动方程，所以探地雷达的数据处理和解释多采用反射地震的方法技术，主要修改在于尺度标定和参数选择。跨孔的高频电磁波成像，当井间距离不大时，在探测高导金属矿体和溶洞方向已取得一些成功实例。为了提高高频电磁波法对几何结构的分辨率，发展针对其动力学特征的处理技术势在必行（王妙月等，1998）。

随着数据采集技术的改进，直流电阻率法成像方法近年来也取得了一些进展。在理论上，直流电阻率法成像与地震波和电磁波成像方法不同，直流电场由拉普拉斯方程描述。由于直流电阻率法观测设备与野外作业方法简单、探测深度较大，因此在油气勘探、金属矿勘探和工程勘查中应用前景更广阔。

地球物理对复杂对象的探测，是在计算机技术迅猛发展的带动下才得以实现的。成像技术的特点是未知数多，观测数据量大，只有观测信息对每个未知数的覆盖次数足够多，才能使解出的未知数比较可靠。同样，地球物理勘探结果可视化的需求也推动了计算机技术的进步，并且计算机将在今后的地球物理数据的运算中起主要作用。

### 3. 综合利用多种信息，减少地球物理反问题的多解性

地球物理勘探是通过在地表、空中或井下局部地球物理场的观测结果，去分析推断地下不能直接观测部分物质的性质和形态。由于物质形态和性质变化对地球物理场影响的等效现象，使得反问题解答不唯一。如果再考虑观测误差和干扰等因素的影响，以及描述物理场的数学表达和计算方法的不精细，问题就进一步复杂化。从某种意义上讲，地球物理探测技术就是围绕着如何减少多解性的影响，给出更可靠的地质答案这一目的向前发展的。今后仍将沿这个方向继续前进。

地球物理探测的对象越复杂，表征其性质、结构和构造的变数越多。另外，不同的地质对象可能具有某些相同的物理性质。因此，为准确描述一个复杂的探测对象，或区分不同的研究对象，都应该综合利用多种信息，这已成为广大研究人员的共识。例如在油气勘探中，除地震、测井数据综合外，综合使用其他勘探数据，如重磁勘探和电法勘探数据，在处理复杂地质条件的问题时，也是非常重要的。随着多种信息综合应用的进展，油气勘



探研究思路也在发生变化。油储地球物理的发展就是一个很好的说明(刘光鼎等, 1998)。可以预计, 随着复杂探测对象的不断出现, 将推动综合信息找矿方法进一步发展。同时, 将推动下列几个方面的研究向前发展。

1) 新方法和新参数的探索: 地球物理勘探理论和方法在客观需要的推动下, 始终是在不断完善已有方法和探索新的方法两个方面同时前进的。新的物理参数的应用, 将减小多解性的影响, 例如, 当地震波被利用之后, 通过纵横波综合利用, 大大减小了对岩性判断的不确定性。地震勘探中对多波多分量的研究, 电法勘探中地电化学法和电磁导弹的研究, 以及震电效应和震磁效应的研究等, 都是为探索新方法和新参数所做努力的一部分。当地球物理数据中不含有足够的地质信息时, 只依靠数据处理是达不到目的的, 必须增加新的物性参数以补充和丰富地球物理数据中携带的地质信息, 再通过适当的数据处理方法才有可能获得可靠的地质结论。

2) “直接”找矿和“间接”找矿相结合(孙文珂, 1991; 赵文津, 1991): “直接”找矿是根据矿体或矿体群产生的地球物理场异常直接指出矿体或矿体群的属性、具体位置或其他有关情况。“间接”找矿是根据矿床的直接控矿因素及近矿围岩引起的异常现象指出矿床可能的分布地段。为了正确确定物探的任务是“直接”找矿还是“间接”找矿, 就需要正确了解勘探对象的地质、地球物理特点, 建立目标物的地质-地球物理模型。地球物理勘探的目的是要对地质单元作精细的刻画, 因此模型首先是以地质模型为基础。通过模型建立将得出最佳的勘探工作程序和方法组合, 即勘查工作模式, 以及识别目标物的标志, 即预测目的物的准则(孙文珂, 1988, 1991)。预测准则就是能指示或圈出矿产资源目的物存在的有效标志信息组合或系统。在这个系统中, 如果既包括“直接”找矿信息, 又包括“间接”找矿信息, 将会大大减小解的非唯一性的影响。通过矿床成因模式的研究, 使人们对不同的成矿地质背景下不同类型矿床的成因及矿床赋存条件, 能有一个比较清楚的了解。因此, 借助于矿床成因模式, 人们可以获得清楚的找矿思路和找矿工作方向。地球物理工作者在矿床成因模式的基础上, 结合地球物理场的特征分析, 逐步形成了比较完整的综合找矿模式, 用以指导勘查工作和作为资料解释的依据。按照“模式找矿”的思路, 国内外都有许多成功的找矿实例(何继善, 1997; 赵文津, 1991)。然而, 矿床模式只能代表人们当时对已取得的矿床特征、矿床成因认识的总和。地质情况的变化是十分复杂的, 完全相同的情况是很难遇到的。因此, 既要重视模式找矿, 同时又要考虑到会不会有未包括在已概括的找矿模式之内的新类型矿床或新的矿产资源。特别是在一个新的地区不要拘泥于某一种模式。

3) 正反演方法的改进: 地质现象十分复杂, 其物理场特征的数学表述不够准确, 往往是造成正反演不准确的原因。例如, 一个非线性问题, 往往由于不恰当的用线性近似处理, 得不到好的结果。因此, 地球物理工作者应不断吸收数学等相关学科的最新成果, 来改进地球物理正反演方法, 以取得可靠的地质效果。

4) 多参数联合反演: 对同一研究对象的两种以上物理场的观测结果, 或同一种物性参数两种以上不同观测方式得到的结果进行联合反演, 是减小解非唯一性影响的有效途径之一(王家映, 1997)。

5) 数据综合管理: 为了有效地实现多种信息综合应用, 数据的综合管理是关键因素之一。地球物理与地质数据类型的多样性和数据量的不断增大, 使得数据管理的任务更加