

中 国 现 代 科 学 全 书

CHINESE ENCYCLOPAEDIC SERIES OF MODERN SCIENCES

● 固体地球物理学

● SOLID GEOPHYSICS

● 王妙月 等 编著

# 勘探地球物理学

---

## EXPLORATION GEOPHYSICS

地 震 出 版 社

中国现代科学全书·固体地球物理学

# 勘探地球物理学

王妙月等 编著

地震出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

勘探地球物理学/王妙月等编著. —北京:地震出版社, 2003. 4

(中国现代科学全书·固体地球物理学)

ISBN 7-5028-2112-0

I. 勘… II. 王… III. 勘探地球物理—理论研究 IV. P631

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 049331 号

## 勘探地球物理学(中国现代科学全书·固体地球物理学)

王妙月 等 编著

责任编辑: 薛广盈

责任校对: 张晓梅

---

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 68423031

门市部: 68467991

传真: 68467972

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 潍坊长城印刷厂

---

版(印)次: 2003 年 4 月第一版 2003 年 4 月第一次印刷

开本: 850 × 1168 1/32

字数: 400 千字

印张: 14.875

印数: 0001 ~ 1500

书号: ISBN 7-5028-2112-0/P·1135 (2668)

定价: 30.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

## 中国现代科学全书总编辑委员会

|      |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|
| 名誉主编 | 胡 绳 | 钱伟长 | 吴阶平 | 周光召 |
|      | 许嘉璐 | 罗豪才 | 季美林 | 王大珩 |
|      | 郑必坚 |     |     |     |
| 主 编  | 姜士林 | 郭德宏 | 刘 政 | 程湘清 |
|      | 卞晋平 | 王洛林 | 许智宏 | 白春礼 |
|      | 卢良恕 | 徐 诚 | 王洪峻 | 明立志 |

## 固体地球物理学编辑委员会

|      |          |     |     |     |
|------|----------|-----|-----|-----|
| 主 编  | 徐文耀      |     |     |     |
| 编辑委员 | (以姓氏笔画序) |     |     |     |
|      | 王妙月      | 王谦身 | 叶正仁 | 白武明 |
|      | 姚振兴      | 滕吉文 |     |     |

## 勘探地球物理学编辑委员会

|     |           |     |     |     |
|-----|-----------|-----|-----|-----|
| 主 编 | 王妙月       |     |     |     |
| 副主编 | 底青云       |     |     |     |
| 编 委 | (以姓氏笔画为序) |     |     |     |
|     | 王 贇       | 许 琨 | 李远钦 | 张美根 |

## 序 言

勘探地球物理学是《中国现代科学全书》理学分卷固体地球物理的一个分支学科。

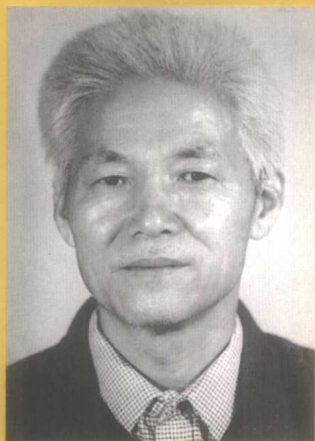
按照全书的编辑大纲和基本内容的要求,本书概述了勘探地球物理学的基本理论,包括勘探地球物理学的研究对象和主要研究范围、特点、地位与作用;勘探地球物理学的起源、历史沿革;勘探地球物理学的基本内容与研究方法;勘探地球物理学和其它固体地球物理学分支学科之间的相互渗透和交叉关系。

本书对 20 世纪勘探地球物理学的发展进行了回顾和总结,对 21 世纪勘探地球物理学的发展进行了展望。包括勘探地球物理学的国内外现状,最新发展;勘探地球物理学急待解决的新内容、新课题;新中国成立以来我国勘探地球物理学科的科研成果;以及 21 世纪勘探地球物理学发展的预测。

勘探地球物理学又有一系列分支学科,例如重力勘探、磁法勘探、地震勘探、电法勘探、放射性勘探、钻井地球物理勘探等。这些基本勘探手段的组合又可以解决工程、环境中的基本问题。因此本书在阐述勘探地球物理的基本内容与研究方法时偏重于上述基本勘探手段相应的分支学科(见第二至第六章)。在阐述勘探地球物理学的起源、发展、沿革、成果、展望时,除了涉及上述基本勘探手段对应的分支学科以外,也涉及油气资源勘探、煤及煤成气勘探、金属矿产资源勘探、水资源勘探、工程勘探、环境勘探等(见第一、七、八章)。

本书的内容是编写组集体完成的。第一章和第七章由王妙月编写,第二章和第三章由张美根编写,第四章由许琨编写,第五章由底青云编写,第六章由李远钦编写,第八章由王赞编写。本书设计与总审由王妙月和底青云完成。

由于编者的水平所限,对我国勘探地球物理学的发展和进展成果难免有疏漏之处,本书给出了一系列参考文献,读者可以参阅以便对该学科得到更全面的了解。



## 作者简介

王妙月，男，1941年6月17日生于上海宝山县，1965年毕业于中国科学技术大学物理系固体地球物理专业，同年分配到中国科学院地球物理研究所，从事地下核侦察及震源物理的研究。1976~1979年从事金属矿地球物理勘探方法研究。1979~1981年美国哥伦比亚大学访问学者，进行地震勘探方法研究。1981年至今除继续从事震源物理研究外，参加了六五、七五、八五、九五、十五油气、金属矿等国家科技攻关课题，研究重、磁、电、震层析成像理论、方法、技术以及粘弹性波偏移成像和衍射波勘探方法。现任中国科学院地质与地球物理研究所指导委员会委员，博士生导师。

## 内 容 简 介

本书阐述了勘探地球物理学的研究对象、研究内容、研究方法及其发展阶段；阐述了勘探地球物理学与地质学、地球化学、计算机等相关学科之间以及勘探地球物理学各分支学科之间相互渗透、交叉、融合的情况，以及新产生的各分支学科；阐述了勘探地球物理学在国民经济可持续发展中的地位、应用及其互动关系；阐述了勘探地球物理学在20世纪各个发展阶段中所取得的进展，以及新中国成立后，我国在这一领域突飞猛进的发展及所取得的成果。本书也展望了21世纪勘探地球物理学及其各分支学科新的发展方向，并详细论述了在资源和能源勘探、减灾防灾以及环境保护中的潜在应用前景。



## 目 录

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 第一章 勘探地球物理学概述 .....                | ( 1 ) |
| 第一节 勘探地球物理学的研究对象 .....             | ( 1 ) |
| 第二节 勘探地球物理学分支学科及其发展阶段 .....        | (27)  |
| 第三节 勘探地球物理学的地位、作用<br>及其新的增长点 ..... | (36)  |
| 第二章 重力勘探 .....                     | (44)  |
| 第一节 重力勘探基本原理 .....                 | (44)  |
| 第二节 重力观测与资料整理 .....                | (54)  |
| 第三节 重力异常处理与解释 .....                | (65)  |
| 第四节 重力勘探的应用 .....                  | (81)  |
| 第三章 磁法勘探 .....                     | (85)  |
| 第一节 磁法勘探基本原理 .....                 | (85)  |
| 第二节 磁法观测与资料整理 .....                | (94)  |
| 第三节 磁法资料处理与解释 .....                | (98)  |
| 第四节 磁法勘探的应用 .....                  | (118) |
| 第四章 地震勘探 .....                     | (121) |
| 第一节 地震勘探基本原理 .....                 | (121) |
| 第二节 地震波的时距曲线 .....                 | (133) |
| 第三节 地震观测仪器 .....                   | (140) |

---

|            |                            |              |
|------------|----------------------------|--------------|
| 第四节        | 反射波地震勘探 .....              | (143)        |
| 第五节        | 衍射波地震勘探 .....              | (169)        |
| 第六节        | 其它地震勘探方法 .....             | (177)        |
| 第七节        | 地震勘探的应用 .....              | (182)        |
| <b>第五章</b> | <b>电法勘探 .....</b>          | <b>(184)</b> |
| 第一节        | 电法勘探基本原理 .....             | (184)        |
| 第二节        | 直流电法勘探 .....               | (186)        |
| 第三节        | 电磁测深 .....                 | (224)        |
| 第四节        | 激电勘探 .....                 | (235)        |
| 第五节        | 雷达波勘探 .....                | (256)        |
| 第六节        | 电性与地质解释 .....              | (266)        |
| <b>第六章</b> | <b>综合地球物理方法 .....</b>      | <b>(271)</b> |
| 第一节        | 放射性勘探 .....                | (271)        |
| 第二节        | 井中地球物理勘探 .....             | (286)        |
| 第三节        | 井间地球物理方法 .....             | (316)        |
| 第四节        | 地震地层学 .....                | (329)        |
| 第五节        | 油储地球物理学 .....              | (340)        |
| <b>第七章</b> | <b>20 世纪的勘探地球物理学 .....</b> | <b>(356)</b> |
| 第一节        | 20 世纪我国的重磁勘探 .....         | (356)        |
| 第二节        | 20 世纪我国的电法勘探 .....         | (367)        |
| 第三节        | 20 世纪我国的地震勘探 .....         | (373)        |
| 第四节        | 20 世纪我国的石油地球物理勘探 .....     | (381)        |
| 第五节        | 20 世纪我国的煤田地球物理勘探 .....     | (389)        |
| 第六节        | 20 世纪我国的金属矿地球物理勘探 .....    | (398)        |
| 第七节        | 20 世纪我国的水文、工程、环境物探 .....   | (406)        |

---

|                                  |              |
|----------------------------------|--------------|
| <b>第八章 21 世纪的勘探地球物理学发展趋势预测</b>   | <b>(415)</b> |
| 第一节 21 世纪的勘探地球物理学与国民<br>经济的可持续发展 | (415)        |
| 第二节 21 世纪的地震勘探                   | (421)        |
| 第三节 21 世纪的重、磁位场勘探                | (434)        |
| 第四节 21 世纪的电法勘探                   | (442)        |
| 第五节 21 世纪的震电勘探                   | (446)        |
| 第六节 21 世纪的考古及环境地球物理学             | (446)        |
| 第七节 21 世纪的地球物理测井                 | (448)        |
| <b>参考文献</b>                      | <b>(454)</b> |

## 第一章 勘探地球物理学概述

### 第一节 勘探地球物理学的研究对象

勘探地球物理学 (Exploration Geophysics) 又称地球物理勘探 (Geophysical Prospecting) 或称应用地球物理学 (Applied Geophysics), 简称物探。勘探地球物理学在国民经济可持续发展中占有极其重要的位置, 因此勘探地球物理学是固体地球物理学中, 从事研究的人员最多、最富有生命力的分支学科。

固体地球物理学是用物理学的理论、方法和观点研究固体地球的运动、状态、组成、作用力和各种物理过程的一门科学。所谓固体地球是相对于大气和海洋而言的。其实地球本体之内, 也并非全部是固体, 例如: 地核的外层就处于液态, 但它仍属于固体地球物理学研究的范围。固体地球物理学研究的深度范围从地表直到地心。

勘探地球物理学则采用地球物理方法, 测量油气、矿产等资源深度范围内 (从地表至 5 ~ 6 km 深) 被勘探区的地球物理场, 通过对测量的地球物理场数据处理解释, 发现地下可能存在的局部地质体、地质构造, 并推断它们的位置、大小、埋深以及属性。近年来由于研究工作的深入也开始探讨地质体属性的时间变化, 称谓四维 (空间三维加时间一维) 勘探。由于与地质体有关的地球物理场存在的空间范围比地质体本身大得多, 故可在远离地质体的地面、水面、坑道、井间或空中来探测, 这是勘探地球物理的长处。然而实测的是地球物理场而不是地质体本身, 因此它是一种间接的勘探方法, 不能完全取代钻探等地质勘探手段。勘探地球物理学将资源、环境、工程以及与人类活动有关的一切地质问题、物理过

程的地球物理探测理论、方法、技术以及与此相关的所有问题作为其研究对象。

## 一、观测设备及观测系统

勘探地球物理学首先是一门观测的科学,它需要在野外用观测仪器观测所需的地球物理场数据,需要有先进的装备将观测仪器以及必要的工作人员运送到需要的地点,需要布置最佳的观测系统,以便最有效地采集到能反映探测目标的地球物理场信息。因此观测仪器、野外装备、观测系统始终是勘探地球物理学研究的重要对象之一。

作为一个观测仪器首先要求测量的信息可靠、稳定,要求有很高的测量精度,同时也要求轻便,便于携带,有些仪器还需要考虑能源,有此还需考虑载体,例如车载、飞机、船只等。所有这些都是仪器研制中必须考虑的。经过一代又一代仪器研制者的不断努力,不断将新的思想、新的原理、新的技术、新的工艺应用到仪器研制中,一代又一代的新仪器不断问世,一代又一代的仪器使用者又提出更新的仪器设计要求。地球物理观测仪器在研究者的不懈努力下不断取得进步,不断更新换代。

### (一) 磁法仪器

地球物理勘探中的磁力勘探最早使用的仪器实际上是中国古代发明的罗盘。1640 年左右,瑞典人用从中国传入欧洲的罗盘找磁铁矿。此后直到 20 世纪 40 年代之前,磁力勘探的观测仪器发展较慢。20 世纪 40 年代晚期,磁场测量开始采用扭称,通常只测量垂直分量,而且主要是在陆地地表测量。此后磁力观测仪器的研制发展很快。在第二次世界大战期间,因从飞机上探测潜艇的需要发展了磁通门磁力仪。磁通门磁力仪的问世加上雷达导航使得航磁测量成为可能。质子核旋磁力仪在 20 世纪 50 年代中期得

到发展,仪器性能可靠,操作简单和快速,它们至今仍是最广泛使用的仪器。光泵真空磁力仪,1962年开始使用,精度很高,然而核旋、光泵磁力仪只测磁场强度,不能测方向。20世纪60年代晚期航空梯度磁力仪问世,使得开始可以测量磁场梯度。20世纪70~80年代超导磁力仪开始问世,这种仪器不仅灵敏度高(能测 $10^{-5}$ nT(纳特)),而且是分量测量,能测各个分量、不同方向的梯度。磁法仪器不仅可以放到飞机上,而且已经放到了卫星上。

## (二) 重力仪

地球物理勘探中的重力勘探需要重力仪。早在16世纪,伽利略(1564~1642年)就发现了自由落体原理,首次测量了重力加速度。18世纪中叶 Pierre Bouguer 建立了许多引力关系式。1817年 Henry Kater 引进了复合摆,其悬挂中心可调,成为几个世纪以来主要的重力测量工具。19世纪末 Von Eötvös 引进了扭称,用来测量重力梯度,代之于测量总强度。直到20世纪20年代,除扭称以外,便携式摆开始问世,到了20世纪30年代末40年代初 Lacoste 类型的重力仪开始问世,逐渐替代扭称和便携式摆,按其弹性材料的不同又可分为石英重力仪和金属重力仪。中国、加拿大、美国、前苏联、德国都有生产,读数精度达 $\pm 10\mu\text{Gal}$ 微伽,美国的 Lacoste D型重力仪,读数精度最高,可达 $\pm 5$ 微伽。安装在运动载体上的重力仪也已问世,如海上重力仪、航空重力仪、卫星重力仪。目前海上重力仪的精度国外可达0.5毫伽,国内、可达毫伽。航空重力仪精度国外达1毫伽,卫星重力仪达数毫伽。

## (三) 电法仪器

在勘探地球物理学中,电法勘探的种类比任何一种勘探地球物理学分支学科的种类都多,因此电法勘探仪器的种类也是五花八门,但大体上分为二类:一类测天然场,一类测人工场。

最简单的莫过于测自然电位的仪器,方法可追溯到1830年,Robert Fox 试图用于探测铜矿的范围,到1920年该方法已广泛使

用,测量时只须两根电极一个毫伏计,但电极需用不极化电极以降低电化学反应造成的电极的接触电位,毫伏计的输入阻抗需足够大以阻止测量时由额外的电流从地下流入。自前苏联发明了硫酸铜不极化电极以来,法国、美国、加拿大等国发明了氯化铅的液体不极化电极,而我国则实现了固体不极化电极。

毫伏计则随着其它电法勘探方法所使用的仪器的进步而进步。测天然场的另一种方法是测天然大地电流或磁大地电流,称 MT 方法。用测大地电流的仪器测量电极之间的电位差,磁大地电流仪除了测电极之间的电位差以外还用磁法仪器(通常用磁通门磁力仪)测磁场的三个分量。为了消除各种电干扰,仪器中需要设计各种滤波器,为了增加信号需要设计前置放大器,用磁带记录,现已微机化和采用数字记录。用连续的人工电磁波进行勘探早在 20 世纪 20 年代在 Scandinavia 就开始,称谓 EM 法,20 世纪 30 年代后发展了航空 EM 法。在 20 世纪 60 年代早期,发射、接收单频连续波,相当于频率域工作,称为 FEM 或 FDEM。时间域方法的发展可追溯到 1930,但直到 1962 年前未获成功,第一次成功应用是 1962 年,此后机载的地面的瞬变脉冲或电磁勘探仪器问世,发展了时间域 EM 方法,称为 TEM 或 TDEM。频率范围达到(1~100) MHz 的探地雷达仪 GPR 也已问世,目前瑞典、美国、加拿大等都有这方面先进的仪器设备,如瑞典 RAMAC 系列,美国 Terrascan MK 系列,加拿大 Pulse EKKO 系列。

音频范围的 MT 称为 AMT,测人工场,需发送设备和接受设备,发送信号可控,称为 CSAMT。MT,AMT,CSAMT 类型的仪器发展很快,加拿大有  $V_4$ 、 $V_5-16$ 、 $V_5-2000$  及  $V_6$  等,美国有 GDP-16, GDP-32,德国有 MMS02、MMS03、MMS05、MMS06 等,对于级别较高的仪器,例  $V_5$ 、MMS05 等既能做天然场的测量又能做人工场的测量,且是多道的,美国的仪器道数可多到 60 道,加拿大  $V_5-2000$  理论上可任意多道。近年来测电磁场的先进设备使得发展电磁场

的类反射地震勘探方法成为可能。

电法中还有测二次场的 IP 法, 称谓激发极化法, 激发极化效应是 Schlumberger 兄弟在 1930 年做自然电场测量时认识到的。作为测激发极化效应的激发极化方法始于 20 世纪 50 年代中期, 目前时间域多道激电仪、频率域宽频频谱激电仪和时域、频域、复电阻率兼能测量的激电仪发展水平已比较高。

#### (四) 地震仪器

地震学中天然地震的理论先于地震勘探而问世, 地震波理论先于地震仪而发展。中国古代科学家张衡在公元 132 年发明了世界上最早的地动仪。1854 年, Mallet 用人工源做地震波速测量试验开创了地震勘探理论的研究。地震勘探观测设备激发和记录人工地震波场, 通常包括震源、检波器、电缆以及记录设备。

震源有炸药、重锤、电火花、气枪、可控机械震源等。检波器分水陆两种, 水中的称水声检波器。记录载体有纸记录和磁带记录两种, 最早的纸记录为熏烟记录, 20 世纪 50 年代前普遍使用的是光记录, 热敏纸记录至今仍很普遍。模拟磁带记录是 20 世纪 50 年代开始的, 20 世纪 60 年代开始数字磁带记录。磁带记录特别是数字磁带记录, 允许资料在室内回放和方便地进行各种室内资料处理, 包括叠加、偏移处理, 从而降低了对现场野外震源信号强度的要求。弱信号震源纷纷问世, 包括气枪(海上)、可控机械震源(陆上)。可控机械震源 1953 年问世, 但直到解决了能发送长时间的多重覆盖信号以及能处理复原成脉冲式记录的技术后才得到广泛的应用。目前可控机械震源不仅可应用于浅层勘探, 而且也应用于深地震测深。

数字多道记录仪器的问世, 特别是记录道数的迅速增加(可增至千道)使得可以采用多次覆盖技术。野外观测系统也由 2D(二维)扩展到 3D(三维)。地震勘探船的研究成功, 使得海上 3D 勘探成本大大降低。陆上地震勘探装备的进步, 使得在山区、沙漠也可



做 3D 勘探。目前数字地震的动态范围已由 40 dB 扩展到 84 ~ 120 dB, 频率范围已由 20 ~ 30 Hz 扩展至数百赫。近年来在探测潜水面的特征时, 国外已报道使用数百赫的记录。野外观测仪器以及观测系统的进展容许采集大量的资料, 信息量成幕次增长, 高速大容量计算机以及地震专用处理系统、地震处理工作站的问世使得采集的大量地震资料的处理解释成为可能, 并大大提高了勘探的分辨率和可靠性, 使地震勘探成为一种最主要的地球物理勘探手段。由于地震勘探观测设备和观测系统的进步, 使得过去勘探过的地方重新开始新一轮的地震勘探。

尽管重、磁、电、震等各种地球物理仪器的研制已经有了长足的进步, 然而随着地球物理勘探研究工作和实践工作不断深入, 容易勘探的对象已经逐步得到解决, 进一步需要勘探的对象的地质结构往往变得愈来愈复杂, 愈来愈精细。例如遇到了需要查清米级薄互层储油结构问题, 遇到了在潜山复杂结构中储油结构的勘探的问题, 遇到了隐伏金属矿复杂容矿和控矿构造勘探问题等。此外勘探场地的复杂程度也在增加, 例如塔里木塔克拉干沙漠深油气目的层低幅构造勘探问题, 四川山地地震勘探问题。野外资料采集的作业范围越来越少, 场地环境越来越恶化, 例, 需在错综复杂的建筑群区查清地下管线的分布问题, 在高山峡谷区查清铁路路基、隧道、软弱地质结构和滑坡的可能性等问题。一些新的问题的解决日益迫切, 例如认识古环境的演化是推断今天环境变迁的重要途径, 离现在越近的古环境对于推断今天环境变迁趋势越重要, 而离现在越近的古环境信息的载体地层越薄, 因此需要解决的勘探深度是米级、勘探精度是厘米级的勘探技术问题等等。所有这些遇到的新问题要求相应的新仪器、新设备、新装备、新观测系统问世。因此在步入 21 世纪的时候, 新的更有效的观测仪器、观测系统的研制仍然是地球物理勘探的一个重要研究对象。