普通高等教育地质资源类教材

资源综合地球物理勘查

李舟波　孟令顺　梅忠武　编著

地质出版社

·北　京·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 提 要

本书全面介绍了我国在金属与非金属矿产、石油和天然气、地下水和地热等资源勘探中地球物理探测方法的应用历史和发展现状。分别对不同资源勘探中所采用的主要地球物理方法、理论和技术做了扼要论述，并给出了大量应用实例。对于地质资源勘探中地球物理面临的问题和新世纪发展趋势作了分析和展望。

本书资料丰富，内容充实，可供高等院校地质资源勘探及有关工程技术专业作为教材或教学参考书，也可供从事各类资源勘探的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

资源综合地球物理勘查/ 李舟波，孟令顺，梅忠武编著 . —北京: 地质出版社，2004 . 9

ISBN 7 - 116 - 04213 - X

Ⅰ . 资 . . . Ⅱ . ①李 . . . ②孟 . . . ③梅 . . . Ⅲ . 矿产 - 地球物理勘探 - 高等学校 - 教材 Ⅳ . P631

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 094662 号

责任编辑: 林清　王　璞　陈　磊
责任校对: 郭惠兰
出版发行: 地质出版社
社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号，100083
电　　话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324565 (编辑部)
网　　址: http:/ / www .gph .com .cn
电子邮箱: zbs@ gph .com .cn
传　　真: (010) 82310759
印　　刷: 北京朝阳区小红门印刷厂
开　　本: 787 mm×1092 mm
印　　张: 14.5
字　　数: 350 千字
印　　数: 1—2000 册
版　　次: 2004 年 9 月北京第一版·第一次印刷
定　　价: 18.00 元
ISBN 7-116-04213-X/ P·2511

(凡购买地质出版社的图书，如有缺页、倒页、脱页者，本社出版处负责调换)

前　　言

资源地球物理探测是20世纪初地学中出现的一门年轻学科。它是以地质资源探测为目的，以物理学的原理和方法为手段的一门边缘学科。由于它在地质资源勘探中的突出效果，获得了快速发展，到20世纪下半叶已逐步形成了完整的理论、方法与技术体系，成为资源调查勘探最基本的重要手段之一。论述地球物理探测的理论、方法、技术以及成果解释的书籍已相当普遍，但是以中国各种地质资源，包括金属与非金属矿产、石油与天然气、地下水和地热勘探为主线，全面叙述地球物理探测方法应用的书籍还是空白。本书一方面试图使读者对地球物理探测方法在中国地下资源勘探中取得的新成果有一个全面的了解；另一方面针对各种地球物理探测方法在寻找不同矿产资源所起到的特殊作用和位置，及其各方法本身的进展也作了相应的叙述。这是因为地球物理勘探各阶段取得的地质成果，是和其本身的技术进步和发展紧密相关的。

本书共分八章。第一章系统地回顾了我国地球物理探测的理论、方法和技术的发展以及取得的主要成果，从而可以清楚地看到它在资源勘探中的地位和经济建设中的作用。第二章是讲述资源地球物理探测的地质-地球物理前提。地球物理探测是地质学与物理学相结合的产物，因此地质的先验知识和岩、矿石物理性质的分析，既是合理布署地球物理工作的基础，同时也是对地球物理观测结果解释的依据。对地下地质体产生的地球物理场的正演和反演，是地球物理数据解释中的两个重要组成部分。这一章以一些简单形状的地质体为例，对地球物理场的正演和反演概念作了一般性介绍。第三、四、五、六、七章分别讨论了在探测金属与非金属、煤、石油与天然气、地下水及地热资源过程中使用的各种地球物理方法的原理和技术。虽然这些方法是结合勘探对象分散讲述的，但是也覆盖了现有主要物探方法的主要方面，包括以岩、矿石磁性差异为基础的磁法勘探；以岩、矿石密度差异为基础的重力勘探；以电性差异为基础的电法勘探；以放射性差异为基础的放射性勘探和以岩、矿石弹性差异为基础的地震勘探。其中对利用以上物性差异为基础的各种测井方法也分别作了扼要的介绍，并给出了相应具有代表性的应用实例。第八章是资源地球物理探测面临的任务、问题和发展趋势。经济增长对资源的需求仍然是我国面临的一个突出问题。随着勘探对象复杂程度的加大和对勘探精度要求的进一步提高，在国家计划启动的新一轮国土资源调查中，无论对基础地质调查还是固体矿产、石油与天然气、地下水和地热资源勘探，地球物理勘探都将担负起更重要的任务，特别在海洋、沙漠以及森林覆盖等工作困难地区尤为突出。因此，必然推动地球物理探测的理论和方法技术有更大的进展，在数据采集、处理与解释以及数据管理等方面将发生较大变化。文中对可能的发展趋势作了分析。

本书第一、六、七、八章由李舟波执笔，第二、三章由孟令顺执笔，第四、五章由梅忠武执笔完成。

作者虽力图全面地反映我国资源地球物理探测的突出成果，但由于本书涉及的内容十分广泛，遗漏或不妥之处一定存在，敬请读者批评指正。

目　　录

前　言
第一章　资源地球物理探测概述 …… (1)
　第一节　地球物理探测在资源探查中的作用和地位 …… (2)
　第二节　地球物理探测方法及其发展历程与现状 …… (4)
　　一、重力勘探 …… (4)
　　二、磁力勘探 …… (5)
　　三、电法勘探 …… (7)
　　四、地震勘探 …… (9)
　　五、核地球物理勘探 …… (10)
　　六、地球物理测井 …… (11)
　　七、遥感 …… (13)
第二章　资源地球物理探测的地质-地球物理前提 …… (15)
　第一节　地质先验知识和地球物理方法选择 …… (15)
　　一、地质先验知识 …… (15)
　　二、地球物理勘探方法的选择 …… (15)
　第二节　岩、矿石的物理性质 …… (17)
　　一、岩、矿石的磁性 …… (17)
　　二、岩、矿石的密度 …… (19)
　　三、岩、矿石的电学性质 …… (20)
　　四、岩、矿石的放射性 …… (24)
　　五、物质的弹性 …… (27)
　　六、岩、矿石的热物理性质 …… (29)
　第三节　岩、矿体的天然赋存状态与地球物理场的关系 …… (31)
　　一、岩、矿体的天然赋存状态与重、磁场的关系 …… (32)
　　二、岩、矿体的天然赋存状态与电场的关系 …… (38)
　第四节　物理-地质模型的建立 …… (47)
　　一、物理-地质模型的特点 …… (48)
　　二、物理-地质模型的建立 …… (48)
第三章　金属矿产的地球物理探测 …… (50)
　第一节　矿产勘查阶段的地球物理探测方法 …… (50)
　　一、高密度矿体的地球物理探测方法 …… (50)
　　二、强磁性矿体的地球物理探测方法 …… (61)
　　三、高导电矿体的地球物理探测方法 …… (71)

四、高放射性矿体的地球物理探测方法 …… (93)
第二节 矿产普查阶段的地球物理探测方法 …… (99)
第四章 石油与天然气地球物理探测 …… (104)
第一节 地震勘探 …… (105)
一、折射波法 …… (105)
二、反射波法 …… (105)
三、地震勘探数据的采集 …… (108)
四、地震勘探资料处理 …… (113)
五、地震勘探新技术 …… (120)
第二节 电法勘探在油气勘探中的应用 …… (129)
一、直流电测深法 …… (129)
二、大地电磁测深法 …… (129)
三、瞬变电磁测深法 …… (130)
四、激发极化法 …… (131)
第三节 重力、磁法与放射性物探在油气勘探中的应用 …… (133)
一、重磁勘探 …… (133)
二、放射性勘探 …… (137)
第四节 地球物理测井 …… (140)
一、测井方法概述 …… (141)
二、地球物理测井在石油勘探与开发领域的应用 …… (154)
第五章 煤及非金属固体矿产地球物理探测 …… (158)
第一节 煤田勘探的地球物理方法 …… (158)
一、岩石及煤的物理性质 …… (158)
二、煤田地震勘探技术 …… (160)
三、煤田测井 …… (161)
四、煤田电法及重磁勘探技术 …… (164)
第二节 非金属固体矿产地球物理勘探 …… (167)
一、非金属矿产的分类 …… (167)
二、地球物理方法在非金属矿产找矿中的应用 …… (168)
三、主要非金属矿产找矿可能应用的地球物理方法组合 …… (169)
四、非金属矿产地球物理探测实例 …… (176)
第六章 地下水资源的地球物理探测 …… (180)
第一节 地下水的赋存状态 …… (180)
第二节 含水储层的类型 …… (181)
一、孔隙含水层 …… (181)
二、裂隙含水层 …… (182)
三、岩溶含水系统 …… (183)
第三节 电法勘查地下水技术 …… (183)
一、电阻率法 …… (183)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

二、激发极化法 …… (188)
三、自然电场法和充电法 …… (193)
第四节　地球物理测井 …… (195)
一、确定含水层位置 …… (195)
二、确定地层水的矿化度和划分咸淡水界线 …… (197)
三、水文地质参数的估计 …… (197)
第五节　核磁共振法 …… (200)
第六节　其他地球物理方法在水资源调查中的应用 …… (202)
第七章　地热资源地球物理探测 …… (204)
第一节　中国地热资源基本类型与特征 …… (204)
第二节　地热储层及其地球物理特征 …… (206)
一、岩石中热的传播 …… (206)
二、地热储层的地球物理特征 …… (206)
第三节　地热储层的地球物理探测方法 …… (207)
一、测温法 …… (207)
二、电法 …… (210)
三、重力探测 …… (213)
四、磁力探测 …… (213)
五、放射性探测 …… (214)
第八章　资源地球物理探测面临的任务、问题和发展趋势 …… (218)
第一节　资源地球物理探测面临的任务 …… (218)
第二节　地球物理探测技术面临的问题与发展趋势 …… (220)
参考文献 …… (223)

第一章　资源地球物理探测概述

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，人类对能源和矿物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和开采，依据油苗、露头或其他暴露形式为线索寻找矿产资源的传统方法，面临越来越大的困难。

面对着这些挑战，促使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。于 20 世纪初开始，一个地质学与物理学的边缘学科——勘探地球物理学逐渐形成。

勘探地球物理学是通过观测由于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。根据所利用的岩石物理性质不同，已形成了重力勘探、磁力勘探、电法勘探、地震勘探、地热勘探、放射性勘探（或称核地球物理勘探）等。按照工作空间位置的不同，有时地球物理勘探又划分为地面、海洋、航空和钻井地球物理勘探等。按照勘探对象，有时划分为金属与非金属、石油与天然气、煤、水文、工程与环境地球物理勘探。从某种意义上来说，地球物理探测方法是属于遥感遥测技术。但是，近年来把由航空地质摄影发展起来的，在空中观测地面对一定频率范围电磁波反射与辐射的方法，专门称之为遥感测量。

由岩石密度、磁性和放射性等造成的重力场、磁场和放射性场等，称为天然场，可以通过直接观测这些场的变化推测地下岩石密度、磁性和放射性的分布情况。然而，有些物理性质，如导电性、声波传播特性等，则需要通过观测人工场源激发的人工场，才能推测出。无论是通过观测天然场还是人工场来了解地下地质情况，地球物理探测方法从本质上讲都是间接的方法，都是通过少数观测点（在地面、空中或井下）获得的数据去推测地下研究对象的状况。这个推测过程，在地球物理学中称为解反问题。很显然，推测结果受观测过程中许多干扰因素的影响而出现误差。然而，即使在观测精度很高、干扰因素很小的情况下，地球物理反问题的解也存在非唯一性，或称多解性。也就是说，地下地质体的不同状况可以在观测点造成相似的物理场分布。例如，一个埋藏深度较大的大球体在地表引起的重力异常，有可能同一个埋深较浅的相同密度的小球体引起的重力异常相同。解的非唯一性是各种地球物理探测方法普遍存在的问题。为了减小非唯一性的影响，往往需要综合采用多种地球物理方法。

从地球物理探测技术所包括的三部分内容，即数据采集、处理和解释来看，它应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　地球物理探测在资源探查中的作用和地位

勘探地球物理学虽然是地学中一个比较年轻的应用学科，从 20 世纪 20 年代才逐渐成为地球物理学的一个独立分支，但是由于它在地质勘查中的突出作用发展极为迅速，到 20 世纪后半叶已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和地热等资源勘探的各阶段，都发挥着重要作用。

地球物理探测是依据地面露头或钻井岩心观察分析推断地下地质情况的传统地质方法的延伸和扩展。它是通过适当的仪器在地面、海洋、空中和钻井中观测地球物理场来研究无法直接观测部分的岩层物理性质，来达到推断地质构造、成分和演化过程的。钻井、矿井所能达到的深度和涉及的范围是很有限的，因此地球物理探测是获得钻井以外隐蔽部分信息的基本手段。同时，地球内部物理状态的研究也是对地下构造、成分和演化过程研究的一项重要内容。因此，地球物理探测既是地质研究的一个手段，同时也是地学研究的一项基本内容。

为了高效率地寻找地质资源和探明资源量，勘探工作应遵循符合认识规律的勘探程序，按阶段进行。由于不同找矿阶段的目标物是不同的，因此地球物理探测技术方法的选择，也应与之相适应，才能有效地发挥不同方法的作用。勘探工作的各个阶段，既有独立性又有连续性。正确处理勘探阶段之间的相互关系和正确处理勘探对象与勘探技术方法及勘探任务之间的关系，是科学的勘探程序必须解决的问题。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，针对不同的勘探对象和勘探阶段，合理选择综合地球物理探测方法，是布置地球物理探测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 1144×10^4 km^2（其中陆域 934×10^4 km^2，海域 210×10^4 km^2）；航空放射性测量的覆盖面积达 300×10^4 km^2。此外还进行了少量航空电磁法测量。根据航空物探结果已编制了全国 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 万的各类航空物探图件。

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∶50万的重力和磁力资料，能够清楚地圈定构造线及断裂位置。例如，郯庐断裂、青藏高原冈瓦纳与欧亚板块分离碰撞的演化关系，以及扬子地台和华南褶皱系的界限，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，指出成矿远景区，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的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遥感、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。采用的主要地球物理方法为二维、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。这个阶段的主要地球物理工作是地震精查，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。中国石油天然气总公司已形成了八套针对不同储层条件的技术系列（丁贵明等，1997)。

按七大类61种矿产的不完全统计，由物探和物化探综合发现或扩大的矿床近千处，如表1－1所列。

表1－1　七大类矿产的物探与化探找矿成果汇总表

		能源矿	黑色金属矿	有色金属矿	贵金属矿	稀有、稀土矿	非金属矿	地下水及地热	合　计
物探	发现	93	164	47	13	5	45	82	449
	扩大	38	62	15	3	1	28	15	162
综合物化探	发现	3	3	72	39	2	6	4	129
	扩大		4	19	16		5	2	46
合计	发现	96	167	119	52	7	51	86	578
	扩大	38	66	34	19	1	33	17	208
总计		134	233	153	71	8	84	103	786

(引自《中国矿床发现史·物探化探卷》编委会，2002)

从上面的讨论中可以清楚看出，地球物理探测在资源勘探中的重要作用。同时，在地球物理勘探工作部署、数据解释、查证异常等方面都积累了许多宝贵的经验和教训。

另外，在地球物理勘探工作中加强对矿产形成环境的地质学的了解和掌握也是非常重要的，它不仅对地球物理探测方法的选择是必需的，而且对探测结果做出有意义的解释也

是必需的。

第二节　地球物理探测方法及其发展历程与现状

根据所利用的物理性质和应用领域的不同，地球物理探测方法经过半个多世纪的发展，已形成一个比较完整的庞大理论、方法与技术体系。不同地球物理勘探方法，一方面在原理、观测技术和数据处理上有各自的特点，同时在应用中也有不同的优势和局限。

一、重力勘探

重力勘探是以地壳中岩（矿）石间的密度差异为基础，通过观测与分析重力场的变化规律，查明地质构造和寻找矿产的一种地球物理方法。地球的重力是地球质量在观测点上的引力与地球自转所产生离心力之和。实质上，重力观测就是对重力加速度值的测定。测定的方法有绝对值测量和相对值测量两种。相对重力测量是重力勘探的主要方法。

由于观测的重力值还受观测点纬度、高度以及中间层和地形的影响，为了得到反映地下介质密度不均匀性的重力场微观变化，需要对这些影响加以校正。

我国最早的重力勘探是 1936 年李善邦、秦馨菱为探测铅锌矿在湖南水口山进行的。此后，为探测石油，在甘肃等地进行过一些工作。大规模的重力勘探是从 20 世纪 50 年代开始的，到 90 年代中期，全国陆地已完成 1∶100 万比例尺重力调查 700×10^4 km^2，1∶20 万重力调查达 260×10^4 km^2，所取得的结果为我国地学研究和经济建设提供了宝贵的基础资料。根据区域重力调查成果已编制完成全国 1∶500 万～1∶100 万比例尺的重力图，以及一些省区和成矿远景区的 1∶100 万～1∶200 万比例尺的重力图（王懋基等，1997)。这些资料已用于大地构造和深部构造格架研究、地球重力场模型的建立和成矿远景区划。随着仪器制造技术的进步，重力仪的观测精度从几个国际重力单位（10^{-6} m/s^2)，到上个世纪 80 年代后期提高到十分之几国际重力单位，使重力勘探的能力提高到更高的水平。

在石油、天然气勘探中，广泛地进行了 1∶20 万～1∶10 万比例尺的重力普查和详查，测量结果对于确定盆地边界、划分构造单元、确定基底起伏和盖层构造，以及油气远景评价方面，发挥了重要作用。对于局部构造的研究，其精度和分辨率虽然不如地震勘探，但是当区内沉积岩中有火山岩存在时，它作为地震勘探的辅助手段，对于圈定火山岩范围、勾绘火山岩下部的盆地形态等，仍具有很大作用。在构造复杂地区，重力勘探和地震勘探联合使用，对于圈定局部构造有时也能取得很好的效果，如在冀中地区成功地探测了古潜山构造。

在金属矿勘探中，重力测量是地质填图、查明控矿构造、圈定找矿靶区的重要手段之一。根据 1∶5 万重力测量资料可划分断裂和基底岩性，确定火山岩盆地范围和火山岩厚度，圈定隐伏岩体并构制三维模型等，在华北地台、长江中下游、秦巴和华南均有一些成功的例子。重力测量对于直接寻找与围岩有大密度差的矿体，如铁、铬和岩盐等，具有不可替代的优势。例如，新疆鲸鱼和西藏东巧铬矿、安徽大鲍庄和甘肃黑鹰山赤铁矿、甘肃白家嘴子和新疆黄山铜镍矿、新疆小热泉子铜矿以及云南安宁和富民盆地的岩盐矿等。

利用重力测量圈定含煤盆地,在我国辽宁、吉林、湖南和内蒙古等省都有成功的经验。

根据沉积盆地基岩起伏与地温的相关关系，以及根据重力低与壳内熔融岩浆房的关

系，利用重力测量间接寻找地热田，在京津地区和西藏羊八井热田以及其他一些地方都取得了好的效果。

重力勘探能力的提高和上述成果的取得，是以技术的不断进步为依托的，主要表现在：

(1)重力仪精度的提高。20 世纪 50 年代主要使用原苏联的 CH－3、ГАК－3M 和瑞典的诺伽重力仪，精度仅为 (0.2～0.4) ×10^{-5} m/s^2，60 年代主要使用北京地质仪器厂生产的 ZSM 重力仪和美国的瓦登重力仪，以及加拿大的 CG－2 重力仪，精度为 (0.03～0.05) ×10^{-5} m/s^2，到 80 年代，国产的 ZSM－V 重力仪直读测程达 400×10^{-5} m/s^2，精度为 0.03×10^{-5} m/s^2，引进的 LCR 重力仪和 CG－3 型自动重力仪精度达 0.01×10^{-5} m/s^2。

(2) 测点定位和测高技术的进步。20 世纪 80 年代以前是以经纬仪和水准仪以及地形图完成定位和测高的。80 年代以后，采用激光测距测高以及航片定位。到 90 年代已基本采用 GPS 三维定位技术，不仅提高了精度，而且解决了地表工作困难地区，如高山、戈壁、沙漠和滩涂等地区的定位工作。

(3) 高精度重力基点网的建立。在全国已建立了包括 419 个基点的 I 级重力基点网，并且已经和国际重力基准网 (IGSN－71) 接轨，此外还建立了 8 个国家重力仪格值标定场和 3 条国家长基线以及 20 个省级重力仪格值标定场，使重力测量的质量得到严格控制。

(4) 卫星重力数据的应用。卫星重力数据对于大尺度构造和动力学研究，以及海洋地质-地球物理研究有重要价值。我国已在南海的构造研究和油气勘探中应用。

(5) 数据处理与解释方法的提高已从早期手工操作，进入到自动化，建立了包括重力数据、高程数据和处理程序三部分组成的数据库，可完成各项数据改正、处理和成图。方便了数据存储和检索，提高了解释工作效率和质量。20 世纪 90 年代以来，发展了多层密度界面反演、三度体正反演、视密度填图、弱异常增强和提取、小波变换分解重力场、图像处理以及检测油气藏方法和均衡响应函数的应用等，还开发了重力解释工作站和模型数据库。

二、磁力勘探

磁力勘探是以岩（矿）石间的磁性差异为基础，通过观测和分析地磁场的变化特征，查明研究对象地质特征和性质的一种地球物理方法。以资源探测为目的的磁力勘探，主要用于地质填图、预测成矿远景区和直接寻找具有磁性的矿体。我国磁力勘探始于 1936 年，李善邦、顾功叙、秦馨菱等在湖南、四川、云南、贵州等地的铁、铅锌和锡矿区进行了我国早期的磁法勘探工作。20 世纪 50 年代以后，我国磁法勘探进入大发展时期。在地面、空中、海域和钻井中广泛地进行了磁测工作。

我国在磁力勘探仪器研制和生产方面取得的成就，为磁法勘探的发展提供了物质基础和起到了推动作用。早在 20 世纪 50～60 年代就开始研制和生产了地面悬丝式和刃口式磁力仪以及磁通门式和质子旋进式航空磁力仪。70 年代制成了地面磁通门磁力仪、海洋航空质子旋进式磁力仪 (CHHK－1)、磁通门磁力梯度仪和多种类型的光泵磁力仪。80 年代灵敏度达 0.1 nT 的质子旋进式磁力仪 (CZM－2B)、三光系光泵磁力仪 (GB－4) 和高灵敏度氦光泵磁力仪 (HC－85) 相继问世。90 年代研制成 HC－90 航空氦光泵磁力仪，灵敏度达到 0.003 nT，南北工作跨度达 1 700 km。1995 年制成的 HC－95 地面手持式氦光泵磁力仪，灵敏度达 0.05 nT。我国在弱磁测量技术和仪器制造领域居国际先进水平。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

20 世纪 80 年代以前，地面磁测以观测垂直磁异常为主，随着质子旋进磁力仪大规模投入使用，ΔT 测量逐渐成为主流。

到上个世纪 90 年代中期，航空磁测的陆地覆盖面积已达 850×10^4 km^2，毗邻海域约 120×10^4 km^2，广泛开展了比例尺从 1∶100 万～1∶50 万的区域调查，和 1∶5 万和 1∶2.5 万的矿产勘查和地质填图的详查工作。其中大比例尺（≥1∶5 万）占 350×10^4 km^2。在这些工作基础上，出版了全国 1∶100 万和 1∶400 万航磁图（乔日新等，1996)。这些基础资料在资源勘探中发挥了重要作用。我国已拥有适用于不同勘探目的的高精度航磁测量系统。

我国科技人员在航磁和地面磁测数据处理方法方面也多有建树。建立了多种重磁位场处理转换系统。为消除干扰、区分深浅场源、划分区域和局部场、改善不适定变换处理和在强干扰下提取弱异常，研究了多种滤波方法。针对我国多山的特点，为把曲面上观测的磁场换算到水平面上，研制了多种曲面磁场延拓和转换方法。为考虑我国南北方向跨度大，地磁倾角变化大的特点，研究了全变倾角磁化方向转换方法和分带变倾角磁化方向转换方法，提高了大范围化磁极计算的精度（管志宁，1997)。

针对勘探中遇到的斜磁化和低缓异常问题，发展了紧密结合我国实际的磁异常解释理论和方法。针对多种几何形体，正演模拟了在斜磁化条件下磁场的特征，并得出估计地质体形状、产状及圈定其边界的理论与方法。实践中研究总结出的区分矿与非矿低缓磁异常方法和剩余磁异常计算方法，在金属矿区磁异常解释中，取得了突出的找矿效果。在确定含油气盆地磁性基底深度方面，已形成了一套适合我国斜磁化条件下的方法。为解释复杂形体异常的需要，发展了复杂形体正演方法，利用所谓“橡皮膜技术”，实现了复杂磁体可视化，并建立了拟合反演或与最优化反演结合的人机联作系统。为磁性填图而进行的地下磁源分布研究，发展了线性广义逆反演、正则化位场线性规划法、遗传算法和 BP 神经网络等反演技术。

我国从 20 世纪 60 年代起，就对岩石磁性参数的研究和汇总十分重视，为磁异常解释提供了坚实的基础，同时在多参数综合应用方面也做了有益的探索。

半个世纪以来，我国由航磁找到的铁矿占已发现铁矿总数的 80%，如河北武安、安徽霍邱、淮北濉溪、河南许昌、云南大红山、新疆磁海与天湖、陕西柞水大西沟等。随着测量精度的提高以及航磁和其他航空物探方法综合应用，在寻找隐伏矿和弱磁性固体矿床的勘查中，如在圈定新疆、冀东、胶东金矿带和甘肃潮水盆地北缘多金属矿带等的过程中，发挥了重要作用。

地面磁测对寻找和扩大我国铁矿资源，如辽宁鞍山、湖北大冶、内蒙古白云鄂博、河北邯郸、四川攀枝花等，均发挥了重要作用。应用磁法和其他物探方法相配合，在有色、稀有和贵重金属矿产的发现与勘探中也取得了明显效果，如攀西钒钛磁铁矿、长江中下游矽卡岩型铜矿床、辽宁华铜铜矿和吉林红旗岭镍矿等。

井中三分量磁测,对于发现井旁和井底盲矿也有许多成功的例子,如青海赛什塘铜矿等。

寻找油气的航磁测量基本上覆盖了我国各个含油气盆地，共圈出 2200 余处局部构造异常或可能的油气富集带。其中包括 1957 年圈出的松辽盆地坳陷范围及轮廓；1959 年圈出的渤海坳陷；1961 年在华北济黄地区圈出的大沽、大港和三木构造；1979 年圈出的塔北隆起带，以及珠江口、北部湾、东海等坳陷构造带。经后来勘探工作证实，均为我国主要油气产地。20 世纪 80 年代以来，广泛开展了中大比例尺高精度航磁工作，对圈定火成

岩分布范围和其他地震勘探难以解决的问题，发挥了重要的补充作用。

三、电法勘探

电法勘探是以介质的电性差异为基础，通过观测和分析天然及人工电磁场的空间和时间分布规律来查明研究对象的形态和性质的一种地球物理方法。对于以资源勘探为目的的电法勘探来说，涉及的电学性质主要包括岩（矿）石导电性、介电性和极化特性。电法勘探是应用地球物理学中方法种类最多，应用面最广的一种方法。因此，电法勘探的分类方法也有多种。按照电磁场的时间特性，常把电法勘探分为直流电法、交流电法和瞬变或脉冲电法三类。直流电法是通过研究与地质体有关的直流电场分布特征来达到勘探目的的。直流电法利用的场源有人工和天然两种。人工场源的直流电法包括电阻率剖面法、电阻率测深法、充电法、直流激发极化法等。利用天然场源的直流电法有自然电场法等。测量的物理参数为电阻率或视极化率。直流电法是最早使用，理论上比较完善，并已成为普遍使用的常规方法。

交流电法是通过研究与地质体有关的交变电磁场的建立、分布、传播特点和规律来达到勘探目的的。交流电法的场源也有人工和天然两种。由于表征交变电磁场的参量多，如振幅、相位、频率和虚实分量等，因此派生的方法也就比较多。人工场源的电磁法通过研究电磁感应或电磁波传播特性引起的幅度衰减、相位变化等来获得介质的导电性、导磁性和介电性的分布规律。它应用的频率范围很宽，几乎覆盖所有频段。工作在微波频段的探地雷达也属于这个范围。人工场源的交流激发极化法也是金属矿勘探应用比较广泛的方法。天然场源的交流电法包括大地电流法、磁大地电流法和天然音频大地电流法等。

瞬变或脉冲法，也称为过渡场法，是用脉冲式电流作为场源，在断电时测量地下导体感应产生的瞬变二次场随时间的变化。

我国的电法勘探始于 20 世纪 30 年代，1936 年丁毅在安徽当涂铁矿进行了电法勘探工作。1939 到 1942 年顾功叙在云南东川汤丹、易门铜矿开展了自然电场测量等电法工作。系统的电法勘探主要是在新中国成立后才逐步发展起来，并在深部构造、固体矿产、石油、水文和工程以及环境等各个领域的勘测调查中发挥了重要作用。特别是近 20 年来，随着经济建设的迅猛发展和科学技术的进步，电法勘探的理论和技术有很大提高，应用范围也在不断拓宽。

早在 20 世纪 50 年代末，我国就开始了激发极化法的实验研究，当时是以直流（时间域）激电法为主，发展了短导线测量和近场源激电法等。到 70 年代开始研究推广交流(频率域）激电法，主要是变频法。为了适应我国金属矿区地形复杂、交通不便的情况，中南工业大学何继善等提出了双频激电法。它是对变频法的重要发展，目前已在全国推广，并在国外开展了工作。除了金属矿之外，激电法用于寻找水资源，也发挥了重要作用，取得了显著经济和社会效益。衰减时法以及激发比和衰减度等综合找水方法，在实际应用中获得了很好效果。在 80 年代中期，我国还研制了多功能电法找水仪。近年来，我国派往非洲等国的找水队伍，用激电法找水也取得了满意的效果。利用激电法寻找油气资源方面，也进行了有益的尝试。

频谱激电法是 20 世纪 70 年代国际上发展起来的一种新的激电方法，它利用常规电阻率法的电极装置，在超低频段上（$n\times10^{-2}$～$n\times10^{2}$ Hz）作多频视复电阻率 ρ_S 测量，根据

ρ_S 的频谱特性及其空间分布特征，推断地下地质情况，实现找矿的目的。由于这种方法是测量视复电阻率，所以也称为复电阻率法。由于它获得的谱参数可以提供识别和分离激电和电磁效应，以及评价激电异常的宝贵信息，而受到广泛重视。我国于上个世纪 80 年代初开始频谱激电法的理论研究和仪器研制。在方法的物理化学基础、模拟相似准则、复杂条件下三维体的激电和电磁模拟以及由视谱直接反演真谱参数等方面的研究成果，均具有较高理论水平和实用价值。在野外数据采集方法和数据处理与解释软件方面也都达到规范化的要求。

瞬变电磁法早在 20 世纪 50 年代已经提出，80 年代后得到了迅速发展。它是利用一定波形的脉冲激发，在一次场断电后，通过观测二次场随时间的衰减特性，达到研究地质体的一种时间域电磁勘探方法。由于它是在一次场断电后观测纯二次场，因而具有可以进行近区观测，减小旁侧影响增强电性的分辨能力；可以用加大发射功率的方法增强二次场，提高信噪比，从而加大探测深度；可以通过多次脉冲激发，作多次叠加观测和采用空间多次覆盖技术，提高信噪比和观测精度；可以选择不同时间窗口进行观测，有效地压制地质噪声，获得不同探测深度的信息等一系列优点。我国已研制成小功率的瞬变电磁系统。

可控音频大地电磁法 (CASMT) 是在大地电磁法 (MT) 和音频大地磁电法 (AMT) 的基础上发展起来的一种人工源频率域方法。MT 方法的频率范围从 $n\times10^{-4}$～$n\times10^{2}$ Hz。由于频率低，它的探测深度很大，达数十公里乃至一百公里，是研究深部构造的有效手段，但对于浅部的分辨率偏低。为此发展了 AMT 法，它观测主要由雷电作用产生的音频 ($n\times10^{-1}$～$n\times10^{3}$ Hz) 大地电磁场，其探测深度比较适于资源勘探，然而这个频段的天然场强度较弱，信噪比低，为了得到合格的观测数据，需要采用多次叠加技术，使观测时间加长。为克服这个缺点，20 世纪 70 年代初加拿大学者 STRANGWAY 提出沿用 AMT 观测方式，测量人工供电产生的音频电磁场，故称为可控源音频大地电磁法 (CSAMT)。这个方法的场源有磁性源和电性源两种。磁性源 (不接地回线) 产生的电磁场随距离衰减较快，为保持较强的观测信号，场源到观测点距离 (激发距 R) 较小，故探测深度较小，主要用于解决水文、工程或环境地质研究的浅层问题。电性源是在有限长 (1～3 km) 的接地导线中供音频电流，以产生相应频率的电磁场，通常称为双极源。随供电电源功率不同，电性源 CSAMT 法的收发距可达几公里到几十公里，因而探测深度较大，主要用于地热、油气和煤以及深部固体矿产勘查。我国在 20 世纪 80 年代中期开始开展 CSAMT 法的试验和生产工作，并取得良好的地质效果。由于 CSAMT 法野外观测较易进行，生产效率高，一般测点距取得较小，常常与测量电极距相同，所以它兼有测深和剖面测量双重性质，即垂向和横向分辨率都较高，适于立体填图，研究地下电性的三维分布。同任何一种人工场源的方法一样，场源功率的提高受装备过分笨重的限制，因此为了得到足够强的观测信号，收发距也受到限制。收发距相对趋肤深度不是很大时,电磁场进入所谓近区或过渡区。然而卡尼亚视电阻率计算公式是对远区导出的。于是使卡尼亚视电阻率发生畸变,称为近场效应或非波区场效应。我国学者(罗延钟,1995)利用迭代法和数值逼近法建立了新的近场校正方法。然而,近场校正仅能校正非波区场效应造成的卡尼亚视电阻率畸变,并不能将双极源场的近区和过渡区的数据校正为相应地电条件下波区(平面波)的测量结果。所以严格的 CSAMT 定量解释应该直接采用基于实际使用的三维场源建立反演方法。我国学者建立的双极源 CSAMT 法一维正、反演算法,取得很好效果(罗延钟、万乐,1995)。

随着研究的深入和实际工作的需要，以及计算机技术和计算方法的进步，电法成像近年来发展很快。我国在这一领域中的理论和方法也取得许多成果。其中井间无线电波透视开展最早，并在勘查金属盲矿体和岩洞等方面取得实际效果。在石油勘探方面也取得很好的实验效果。采用阵列观测方式的直流电阻率成像方法，是电法近年来发展的一个方面。我国在仪器制造、正反演理论研究和实际应用等方面都达到较高水平（王兴泰等，1996)。

四、地震勘探

资源勘探中的地震学方法是研究人工激发的弹性波在不同地层中传播的规律，如波的速度、波的衰减和波的形状，以及在界面的反射、折射来研究地层埋深、构造形态，以及岩性等。地震勘探在油气勘探中得到了最广泛的应用并发挥了巨大的作用。其次在煤田、盐矿、水资源，以及金属与非金属矿产勘探中都得到不同程度的应用。

产生人工地震波的震源有两大类。一类是炸药震源，一类是非炸药震源，如机械震源、气爆震源、电能震源等。陆地表面进行地震勘探时，主要使用炸药震源和机械震源。在震源产生的地震波向地下传播途中遇到波阻抗界面时，将产生波的反射、折射和波型转换。当这些波中的一部分到达放有检波器的接收点时，检波器把机械振动转变为电磁信号，送到地震仪记录下来。早期的地震仪是以模拟记录的方式，把地震波信号记录在照相纸上，稍后是记录在磁带上，而现代地震仪则是以数字形式记录在磁带上。

利用反射波进行勘探的方法称为反射法地震勘探，由于检波器距源较近，要求的震源能量较低，工作方法较简单。它是油气田和煤田勘探中应用最广泛的方法。在反射地震法数据采集中，为了压制干扰、提高信噪比，大多采用共深度点叠加技术。在地震数据处理中，为得到更精确反映地下地质特征的信息，发展了多种滤波、偏移和叠加等处理技术。反射地震法不仅利用运动学特点研究沉积层的构造特征，而且可以利用动力学特点作岩性研究。目前，已从利用单一纵波垂直分量的地震方法，发展到应用纵波和横波的多个分量，从而可以获得更多的地质信息。三维地震勘探结果，可以清楚地给出油气储层的空间几何结构和参数分布特征。

折射波法地震勘探的检波器必须放在盲区之外，所以要求较强的震源，但干扰较小，容易识别。通过折射波法可以求得界面速度，因而可以了解折射界面的岩石性质。但是，只有当岩层速度高于其上覆地层速度时，才能将此高速层圈定出。此外，由于折射波的相互干扰置换严重，不能独立求得上覆盖层的波速，以及难以研究受屏蔽现象影响的地层等，使得折射波在油气勘探中的应用受到一定限制。但在工程勘探中应用较为广泛。

我国地震勘探是在新中国成立后，随着油气资源勘探工作的开展，才得到迅速发展。由于石油埋藏在地下数百到数千米深，难以直接观测，使地震勘探有了用武之地。目前我国已发现的油气田，大部分都是根据地震确定的圈闭，经钻探发现的。在 20 世纪 50 年代，地震勘探技术水平还不是很高，使用的是光点记录的地震仪。即使在这种情况下，仍然圈出了大庆长垣，为大庆油田的发现奠定了基础。60 年代到 70 年代地震队伍迅速扩大，技术水平也进步很快，采用了模拟磁带记录和多次覆盖技术。相继找到胜利、华北、辽河、江汉等油田。从 1974 年开始使用数字地震仪，至 1986 年已经全部数字化。三维地震勘探是 1980 年开始的，目前已遍及国内各个含油气区，地震仪的平均道数已由早期的 24 道上升至 200 道，甚至上千道，覆盖次数已由 6～12 次上升到 30～300 次，有效反射的

主频率已由 20～30 Hz 上升到 50～60 Hz，观测的动态范围已由 40dB 提高到 80～120 dB。已装备了多套大型并行处理系统和数百套处理工作站，并拥有了自己研制的地震数据处理软件，如 GRISYS。随着三维和高分辨率勘探的进步以及计算机技术迅猛发展，地震资料的处理从传统的批处理向交互处理演变，使处理与解释一体化。进入 90 年代后，井间地震、VSP、多波多分量地震等，也逐步向实用化迈进（王妙月，1997)。

在数据处理与解释理论和方法方面，为适应复杂地质体处理与解释的需要，偏移技术由低角度时间偏移、高角度时间偏移，向叠前深度偏移发展，我国学者在多种偏移技术的研究中，取得了很多成果，并见到了实际效果，如胜利油田古潜山二维地震剖面的叠前深度偏移结果，给出了潜山内幕的清晰反映。各向异性和多相介质的理论与实验研究也有许多的进展，获得不少新的认识。

关于地震技术的发展，我国学者将其概括为“三高一准”，即高信噪比、高保真度、高分辨率和准确成像，使得地震勘探结果的精度大幅度提高，已逐步从做简单构造图，扩展到进行地层、沉积、构造、储层物性、生油评价和超压预测等研究，进而到油气藏流体研究和动态监测。

煤田地震勘探及其相应的研究工作也有了长足进步。石油地震勘探中一些重要技术成果在煤田地震勘探中得到应用。虽然我国煤炭资源丰富，探明储量占世界第一位，是世界上最大的产煤国家。然而由于沿海、中部缺煤省寻找后备基地，以及机械化采煤的需要，要求解决小断层、陷落柱 、顶板漏水、煤层精细划分等问题，煤田高分辨率地震勘探和岩性地震勘探得到较快发展（方正，1994)。

五、核地球物理勘探

核地球物理方法是从探测岩石的天然放射性开始的。其目的是寻找铀矿资源和利用天然放射性划分岩性。随着核物理学和核探测技术的发展，核地球物理学已经发展成综合利用多种核反应效应的方法，并且用途已扩展到探测非放射性的石油、煤、水和金属与非金属矿产。

我国的核物探工作是从 20 世纪 50 年代中期开始，从无到有，逐渐发展起来，目前已建立起比较完整的核地球物理勘探体系，已拥有自己制造的各种类型核物探仪器和测量系统的刻度装置。在核地球物理理论上也有多项新的突破。在找铀矿方面，已编制了中国 1∶100 万和 1∶400 万比例尺的航空 γ 射线照射量率等值图及异常点成果图，1∶200 万比例尺的航空 γ 场分布规律与铀矿产分布图等全国性航空放射性测量图件；已探明上百个铀矿床，提供了可观的工业储量，为我国核能源和国防建设做出了积极贡献（吴慧山等，1997)。

在油气普查勘探中，除进行地面、空中的 γ 射线总强度和能谱测量之外，还发展了多种射气测量技术，以及中子活化技术。对于油田放射性异常形成机制也提出了多种假说。在油气井中的核地球物理探测方法中，利用中子与物质相互作用、γ 射线与物质相互作用，发展了中子测井、密度测井、次生 γ 能谱测井等一整套方法。在油气储层研究与评价中，发挥了重要作用。

在煤田勘探中，γ－γ 测井成为钻孔中划分煤层最有效的方法之一。

在金属与非金属矿产勘探中，核地球物理也得到了广泛的应用。除了直接寻找具有放

射性的钾盐、磷矿之外，利用成岩过程和构造变动等引起的放射性矿物富集与矿产赋存的关系，间接找矿成功的例子屡见不鲜。此外，运用 X 荧光法勘查锡、金、钼、铁、铜矿等，以及利用中子活化勘查萤石矿皆取得了很好成果。

利用核地球物理方法进行水资源勘探和评价也发挥着重要作用，例如利用放射性同位素示踪方法研究水的运移速度，利用碳同位素测量地下水的年龄，利用 γ 法或氡法寻找裂隙含水带，利用 γ－γ 测井研究含水层孔隙度以及利用中子法测定土壤的湿度等。

六、地球物理测井

地球物理测井是通过观测钻孔内地球物理场的变化，来研究井孔周围介质分布特征，从而解决各种地质、工程和有关科学问题，也称为钻井地球物理，或简称测井。由于它的工作领域、观测方式和所要解决的任务，与地面地球物理学方法有较大差别，因而成为应用地球物理学的一个独立分支学科。目前，它在资源勘探与开发、工程与环境监测以及基础地质研究中都发挥着重要作用，尤其在石油和天然气勘探与开发中的作用更为突出，被誉为十大石油科学技术之一。目前，我国在常规测井领域已进入世界先进水平的行列，在成像技术和物质成分分析技术方面，与世界先进水平的距离正在缩小。在测井数据处理与解释方法方面，结合中国的复杂地质情况，已具有一定特色。

我国最早的测井工作是 1939 年由翁文波在四川石油沟 1 号井进行的，以点测方式测出了第一条电阻率曲线和自然电位曲线，并成功地划分了气层。1947 年刘永年在玉门油矿成立了我国第一个专门从事测井工作的电测站。当时使用的仪器都是自己组装的，到 1948 年利用改装的设备实现了半自动模拟记录。当时，从事测井工作的只有赵仁寿、刘永年和王曰才等不足十人。即使在这样条件下，在进行地层对比、判断油层和确定断层位置等方面，测井仍取得了明显效果，显示了测井在石油勘探中的作用和生命力。

中国测井事业的大发展是在新中国成立之后，随着经济建设的发展迅速壮大起来。在北京、上海、西安等地相继建立了仪器制造厂。在借鉴国外技术的同时，迅速形成了自己的设计与制造能力，1958 年由刘永年领导设计的多线式测井仪 JD－581 正式投入使用，是我国测井技术进步的一个重要标志。在以电阻率测井为主的模拟记录时代，这种仪器超过了国外同类产品的水平，我国大庆、胜利、辽河等油田的早期测井工作都是用这种仪器进行的。

从 20 世纪 60 年代初我国陆续开始了声波、感应、侧向、密度和中子测井仪的研制工作。大约从 70 年代初开始，以声波测井和感应测井组合为代表的新测井系列逐步替代以横向测井为主的旧测井系列。从 70 年代后期开始引进国外数字测井仪和数控测井仪，目前我国已能生产技术先进的数控测井仪以及相应的井下仪器，如双感应测井仪、双侧向测井仪、微球形聚焦测井仪、自然伽马测井仪、自然伽马能谱测井仪、岩性-密度测井仪、补偿中子测井仪、长源距声波测井仪、高分辨率地层倾角测井仪、碳氧比测井仪和中子寿命测井仪等。目前，我国拥有各类测井队 500 多个，每年完成超过万口井的测井作业。我国是世界上能够主要依靠本国技术力量和本国制造的仪器设备进行常规测井的少数国家之一。

油气储层评价是测井应用最广和最成功的领域。在我国，从最早在四川石油沟划分气层和在老君庙油田划分出 K、L 和 M 油层，到后来在克拉玛依、大庆、胜利和大港等一系

需要全本请访问 www.ertongbook.com