

油气勘探与石油地质 综合研究

—— 理论 方法和程序

主
编

朱
忠
德

王
益
清

中国地质大学出版社

油气勘探与石油地质综合研究 ——理论 方法和程序

中国地质大学出版社

前 言

在即将跨入新世纪之际,我国油气勘探工作正在和将要发生一系列战略性变化:地区上,由东部向西部发展;地层方面,由中、新生界向古生界发展;沉积盆地类型方面,由张性盆地向叠合-复合盆地、挤压盆地转移;油气勘探投资成本急增,国民经济的需求日益迫切;从勘探到开发的时限要求越来越短。油气勘探所面临的这些变化既需要专业水平精湛的技术专才,也需要了解油气勘探与石油地质研究的理论、技术方法和工作程序,又熟悉相应管理工作的通才。因此,无论是油气勘探科技管理人员还是专业研究人员都面临着拓宽思路、扩大知识面,掌握新理论,学习新技术、新方法的重任。为创造条件,促进油气勘探工作上台阶,我们编著了《油气勘探和石油地质综合研究——理论、方法和程序》一书。

编著本书有两个意图。其一,有利于油气勘探的科技、生产的组织者和管理者了解相关研究领域的知识,以适应油气勘探市场体制下的需要,提高决策能力和管理水平;其二,有利于油气勘探专业研究人员了解和熟悉相关研究领域,借鉴或利用相关研究领域的研究思路、方法和成果,充分运用各领域之间的相互渗透和结合,从多视点加速研究工作的深化,为自己所从事的研究领域服务,推进综合研究工作。

本书由十四章组成。鉴于首选的适用对象是油气地质勘探领域中的科技组织者、管理者和相关研究领域的专业研究人员。在内容上作了如下安排:各章均用一部分篇幅分别阐明本研究领域的概念、发展史、与相关研究领域的关系,指明本研究领域在油气勘探中的研究目的、任务和作用,以及为完成这一任务目前所采用的常规技术、分析手段和主要的最新技术。多数章节还列出了从事研究的工作程序(流程图),以及承担本专业领域研究项目的人员的专业结构和最优化组合。其目的是从专业的视野,为从事油气勘探的组织者和科技管理人员指出实际工作中需要考虑的、审定的具体内容。

各章的主要部分较完整地反映了本研究领域的基本体系,简明地阐述了本研究领域的思路和基本内容,以及近些年来主要进展、发展趋势;列举了国内成果突出、效果显著的实例;以作者现有的认识,归纳了各研究领域目前存在的问题。各章末附了主要参考文献,供需要深入通晓该领域的专业研究人员选择、运用。

为了圆满达到预定目的,本书组章选题力求逼近下列四点。

(1)具有系统性。油气勘探工作从研究含油气盆地到油气资源评价是一个系统的研究工程。广泛涉及地质资源与地质工程两个一级学科和矿产普查与勘探等六个二级学科的十余个研究领域(表1)。本书反映了国内外近20年发展迅速的主要研究领域,包括部分基础研究领域,如地球物理勘探、地球物理测井、含油气盆地沉积学、油气地球化学、含油气盆地构造研究;新兴研究领域,如层序地层学、油藏描述;边缘研究领域,如含油气系统与油气成藏动力学、盆地分析与模拟等。有些具有广泛的实用性,属于比较成熟的技术领域,在整个油气勘探中已经不可缺少,如综合录井,亦被选编入本书。这样,本书基本上覆盖了当前油气勘探和综合研究全过程的基本理论和所运用的新技术、新方法,比较客观地反映了油气勘探自身的系统性。

表 1 油气勘探与石油地质综合研究各领域的学科隶属关系

(学科和代码据国务院学位委员会、国家教委,1997.6)

Table 1 Subordinated relationship between disciplines and different study areas

学科门类 (代码)	一级学科 (代码)	二级学科 (代码)	研究领域
工 学 (08)	地质资源与 地质工程 (0818)	矿产普查与勘探 (081801)	石油资源评价 含油气系统与油气成藏动力学 油藏描述
		地球探测与信息技术 (081802)	应用地球物理勘探 地球物理测井
理 学 (07)	地质学 (0709)	矿物学、岩石学 矿床学 (070901)	含油气盆地沉积学 储层成岩作用 储层表征
		地球化学 (070902)	油气地球化学
		古生物与地层学 (070903)	层序地层学
		构造地质学 (070904)	油气构造研究 含油气盆地分析与模拟

(2)注重实用性。针对油气勘探组织者、科技管理人员和专业研究人员工作繁杂、时间紧的特点,本书各章自成体系。其构成以简明、概括和全面有别于专著,以论题集中、论点突出和篇幅紧凑又不同于教材。以阐述各研究领域形成及发展历史,在油气勘探中的地位、作用,所用的技术方法、工作流程和项目组人员优化配置等为特色。

(3)强调综合性。单一研究领域的研究成果内容集中,深度大。然而单一研究领域的理论和技术在解决油气勘探中的重要问题,如查明圈闭、寻找隐蔽油气藏、优选井位等都存在局限性,常常需要跨部门、跨专业、跨领域的专家进行交错研究,使各领域之间进行理论和方法的交融和技术的交叉。这种交错研究最基本的形式就是多学科多领域的攻关,即需要地质、地球物理、地球化学、甚至油藏工程等诸专家联合作战。油气勘探科研管理人员的任务就是组织、配合与协调上述各类专家的工作。这就决定了管理者自身所具备的知识也必然具有综合性。本书中单章和各章之间所阐述的有些理论、方法相互关联,甚至同一论题从不同学科领域各有侧重的论述。事实上,这种密切关系有的本身就是在相关的基础研究领域发展中产生的,二者内容界线难以厘定,有的则是多学科、多领域综合发展的结果,为保证各章自身内容的完整,更为了适应管理工作的这种综合性特点,本书各有侧重的分章编入,以便参考、选用。

(4)反映创新点。油气勘探研究是一项开拓性和竞争性很强的实践活动。国内外勘探实践揭示了许多新现象,产生了许多新概念,总结成新规律,又发展成为新理论。过去二十年左右,这一过程以前所未有的速度不断发展。例如,层序地层学为我们提供了一种研究岩石和地层,预测岩相变化,圈定烃源岩、储集岩和盖层的新思路和新方法。建立在对烃源岩成烃机理和数学、计算机应用基础上的盆地模拟则可以用图形或图像的形式再现油气生成、运移、聚集和保存过程,并能对有利勘探部位进行预测,是油气资源评价、计算资源量不可缺少的方法。

在编写本书的过程中,我们尽可能最大限度地体现上述进展。本书在王益清高级工程师、

朱忠德教授的主持下撰写。具体分工为：前言，朱忠德；第一章，谢锐杰、钱勇先；第二章，袁志华；第三章，陈立涛、龚福华；第四章，樊太亮、朱玲；第五章，曹守连；第六章，于丙松、朱忠德；第七章，李建明；第八章，王泽中、胡轩；第九章，文志刚；第十章，李熙哲；第十一章，郭齐军；第十二章，樊太亮；第十三章，王振奇；第十四章，张公社、王益清。1997年7月和12月，王益清副总工程师、张师本教授级高级工程师主持了初审和终审。参加评审的有张师本、沈成喜、胡轩、刘效曾、赵孟军、邹义声、杨先茂、蔡克勤、李云昌、苟光汉、李良辰、张宝民等12名教授和专家。他们的意见对提高本书的质量起到了重要的作用。在成书过程中还得到了徐怀大教授、田世澄教授、张昌民教授、陈一鸣教授、梅博文教授、朱扬明教授、张敏博士、蔡永和副教授等的指导和帮助。在此一并致以衷心感谢。

全文由朱忠德教授、王泽中副教授统纂定稿。



1998年2月

目 录

第一章 地球物理勘探	(1)
第一节 概论.....	(1)
第二节 研究现状及发展趋势.....	(2)
第三节 重力勘探.....	(4)
第四节 磁法勘探.....	(6)
第五节 电法勘探.....	(9)
第六节 地震勘探	(11)
第七节 地震地层学	(13)
主要参考文献	(16)
第二章 综合录井	(17)
第一节 概论	(17)
第二节 综合录井的组成	(22)
第三节 与录井有关的钻井工程报告	(27)
第四节 岩屑录井	(31)
第五节 岩心录井	(37)
第六节 气测录井	(42)
第七节 原始记录、原图及完井资料整理.....	(48)
主要参考文献	(51)
第三章 地球物理测井	(52)
第一节 概论	(52)
第二节 测井技术的现状和发展趋势	(53)
第三节 测井方法原理	(59)
第四节 测井资料的应用	(66)
主要参考文献	(70)
第四章 层序地层学	(71)
第一节 概论	(71)
第二节 基本原理	(76)
第三节 研究内容	(79)
第四节 主要研究途径	(81)
第五节 含油气盆地中的应用实例	(84)
第六节 研究现状、存在问题及发展趋势.....	(88)
主要参考文献	(89)
第五章 油气构造研究	(91)
第一节 概论	(91)
第二节 含油气盆地构造特征	(93)

第三节 含油气盆地构造的研究方法	(97)
主要参考文献	(106)
第六章 含油气盆地沉积学	(107)
第一节 概论	(107)
第二节 研究的主要内容	(112)
第三节 沉积相与油气	(126)
主要参考文献	(130)
第七章 储层成岩作用	(131)
第一节 概论	(131)
第二节 研究方法和程序	(133)
第三节 研究成果	(137)
第四节 碎屑岩成岩作用与孔隙演化研究	(138)
第五节 碳酸盐岩成岩作用与孔隙演化研究	(144)
主要参考文献	(151)
第八章 储层表征	(152)
第一节 概论	(152)
第二节 碎屑岩储层表征的内容	(154)
第三节 碳酸盐岩储层表征的内容	(155)
第四节 储层表征技术的应用	(155)
第五节 储层地质模型	(156)
第六节 储层表征中的新技术	(161)
主要参考文献	(165)
第九章 油气地球化学	(166)
第一节 概论	(166)
第二节 常用分析方法	(168)
第三节 在油气勘探中的应用	(179)
主要参考文献	(190)
第十章 含油气盆地分析与模拟	(192)
第一节 概论	(192)
第二节 含油气盆地分析研究内容	(194)
第三节 盆地模拟的概念和内容	(195)
第四节 盆地模拟方法简介	(198)
第五节 盆地分析与模拟所需资料	(202)
第六节 盆地分析与模拟成果报告及图件	(203)
主要参考文献	(203)
第十一章 含油气系统与油气成藏动力学	(205)
第一节 概论	(205)
第二节 含油气系统的基本理论	(207)
第三节 油气成藏动力学	(216)
主要参考文献	(219)

第十二章 油藏描述	(220)
第一节 概论.....	(220)
第二节 主要内容.....	(223)
第三节 基本技术.....	(227)
第四节 油藏描述的应用实例.....	(233)
主要参考文献.....	(237)
第十三章 石油资源评价	(238)
第一节 概论.....	(238)
第二节 常用程序.....	(241)
第三节 不同研究对象油气资源评价的任务及步骤.....	(248)
第四节 油气资源评价的常用方法.....	(250)
第五节 地质风险分析.....	(258)
第六节 勘探决策方法.....	(261)
第七节 成果形式.....	(263)
主要参考文献.....	(263)
第十四章 地层测试	(264)
第一节 地层测试基本原理及分类.....	(264)
第二节 测试工具及工艺.....	(265)
第三节 地层测试井下压力计.....	(268)
第四节 地面流动控制与计量.....	(268)
第五节 钻杆测试设计.....	(269)
第六节 钻杆测试压力分析.....	(273)
主要参考文献.....	(275)

第一章 地球物理勘探

第一节 概 论

地球物理勘探（简称物探）是根据地质学和物理学的原理，利用电子学、信息论和计算机科学等领域的高技术，以岩石间不同物理性质（密度、磁性、电性和弹性）的差异为物理基础，在地面进行地球物理场测量，推断地下的地质构造，寻找可能的储油构造或有用矿藏。它主要包括重力勘探、磁法勘探、电法勘探和地震勘探。

从学科的角度看，地球物理勘探是应用地球物理学的重要组成部分。应用地球物理又是地球物理学的一个分支学科。目前地球物理学主要由固体地球物理学、应用地球物理学、大地测量学、空间物理学和大气物理学等分支学科组成。

一、在油气勘探中的地位

油气勘探有三种方法：地质勘探、地球物理勘探和钻井勘探。地质勘探是通过观察和研究出露在地面的地层和岩石，探讨一个地区有无生成石油和储存石油的条件，对该地区的含油气远景进行评价，指出含油气的有利地区。有时在岩石出露的地区也可直接发现油气藏。在油气勘探的早期（20 世纪初）就是如此。

当用地质方法不能直接找到油气藏时，人们开始利用地球物理方法勘探石油（简称石油物探）。地球物理勘探是根据物理学的原理，利用岩石的物性，通过各种物理仪器在地面或水面观测来自不同深度岩石上的各种物理现象，经过资料处理和解释，进而推断地下地质体的空间展布，寻找可能的储油构造。

第三类方法是钻井勘探法。利用钻井，直接取得地下不同深度上地层的岩石性质，分析岩石中的成分。这种方法不仅成本高，而且效率低。通常只用来验证地球物理勘探的结果，或者取得新探区必要的地层岩性资料。

在上面三类方法中，地球物理勘探起着重要的作用。在油气勘探的不同阶段，物探能解决不同的地质任务。在盆地普查阶段，主要是采集航磁、重力和少量电法、地震资料，了解盆地结晶基底埋藏深度即沉积岩的厚度及变化，划分次一级构造单元——坳（凹）陷和隆起，指出进一步勘探的含油气远景区。在石油详查阶段，应用地震、电法，结合重力资料，在坳（凹）陷中查明区域性断裂带、构造带的分布和走向，查明局部油气圈闭，提供参数井井位。在盆地的第一口井出油以后，出油圈闭区及其所在的二级构造带可进入精查阶段，这时应用三维地震查明局部构造形态、高点位置、埋深及对油气起封闭作用的小断层，为部署探井井位，圈定含油气范围提供依据。在油田进入开发的早期阶段，三维地震结合钻井地质资料进行储层预测，查明对油田开发有影响的小断层。油田进入开发的中后期阶段后，地球物理方

法（三维地震、井间地震和 VSP 等）还可以用来监测油藏动态，进行油藏管理。

二、发展历程

最早用地球物理方法确定储油构造是重力测量。19 世纪末，匈牙利人 Baron Roland von Eotvos 发明了以他的名字命名的扭秤。它能够探测密度异常的隐伏体（如盐丘）。在 1915—1916 年间扭秤曾成功地详查捷克境内的 Egbell 单井油田。

1919 年 Ludger Mintrop 用地震折射剖面法确定地下构造的深度而获得德国专利。1923—1928 年间折射法先后用于墨西哥、得克萨斯海湾沿岸地区和中东地区。在伊朗折射法非常成功地找到了巨大的石灰岩储油构造，它在那里一直被成功地应用达 20 多年。

1919—1921 年间 Karcher 为证明地震反射法勘探石油的可能性在美国俄克拉荷马州中部进行了最初的试验，并取得了成功。但是，直到 1927 年，反射法才作为常规的勘探方法。从那以后，反射法成为所有地球物理勘探方法中应用最广的一种。

在 30 年代，第一台重力仪投入商业性勘探。到 40 年代末期，出现了轻便重力仪，提高了陆地测量的速度，降低了成本。进入 50 年代，各石油公司、地球物理公司和仪器制造商大力发展新的物探仪器和技术。出现了 Thumper 敲击器、Dinoseis 气动震源和 Vibroseis 可控震源等；Harry Mayne 发明了共深度点（CDP）记录技术；用磁带记录资料；用变面积变密度方式显示记录剖面。到 1963 年，开始广泛使用数字记录仪和数字计算机；CDP 技术广泛采用。我国于 80 年代初普遍使用数字记录仪和数字计算机。

自 60 年代中期开始，海上地球物理勘探在几乎所有大陆架地区展开，广泛使用重力、磁法和地震勘探方法。

进入 90 年代，地球物理勘探的方法、技术和仪器在不断地完善、提高和发展，向勘探岩性油气藏和中深层油气藏的方向发展。

三、工作过程

地球物理勘探的工作过程可大致分为三个阶段：野外数据采集、室内数据处理和资料解释。野外数据采集是利用各种地球物理仪器在事先设计好的测量点或测量线（测线）上采集所需要的数据。室内数据处理是将野外采集到的数据进行分类、重排、去噪、加工以及反演等，得出尽可能反映地下地层构造形态的数据集（体），并用适当的方式显示出来。资料解释是根据处理后的数据集，结合勘探地区的地质资料，对地球物理勘探资料进行全面的、系统的解释，并用地质语言表达从地球物理资料中推断出来的地下地质构造形态等地质信息。

第二节 研究现状及发展趋势

一、研究现状

由于 70 年代的能源危机促进了西方国家对油气勘探的大量投资，形成了强大的地震勘探队伍和技术储备。到 80 年代，几乎所有的大型沉积盆地都已经开展了地球物理勘探。在此期间，以地震反射波法为主导的地球物理勘探技术得到了飞速的发展。表现在以下几个方面。

（1）从信号采集到处理解释全面实现数字化，采集仪器精度从几十道发展到一千多道，检波器可以全部遥控。在解释上已经普及专用的地震解释工作站，使地震勘探取得应用的信息

量提高了一个数量级。

(2) 数据处理方面建立了比较适合反射地震信号处理的小波理论,使非线性地震信号处理技术建立在一个牢靠的理论基础上。同时神经网络理论指导下的地震信号处理引起了广泛的重视,在废道剔除、油气预测等方面取得了很好的效果。

(3) 地震偏移理论进一步提高,叠后偏移接近完美,叠前偏移的研究全面展开,并取得了较好的应用成果。基于旅行时和波场的地震层析成像的理论已初步建立,线性算法已经可以使用,但非线性成像问题的研究才刚刚开始。

(4) 地震反演的研究从反褶积跃进为广义线性及非线性反演和波动方程系数项反演问题的研究。线性和非线性地震反演的理论已渐趋成熟,以非线性最优化为基础的非线性波动方程反演也取得了一定的进展,但离实际应用尚有相当的距离。

(5) 瞬变电磁法已在油气勘探中广泛应用。由于发射功率和仪器灵敏度的提高,使该方法的勘探深度大幅度提高,取得了一定的地质效果。

在此期间,我国的油气地球物理勘探技术也得到了很大的发展,三维地震勘探已广泛用于生产中,VSP 技术在全国推广,地震偏移和层析成像技术取得长足进展,地震地层学、定量岩性反演和盆地定量动态模拟逐步得到重视,大功率瞬变电磁法和可控源大地电磁法取得良好的试用效果。

到 90 年代初,油气资源后备基地濒临枯竭,勘探逐渐转入已知沉积盆地内寻找过去难发现的圈闭和储层。为此,对地球物理勘探的理论、方法和技术提出了进一步的要求,以适应油气工业发展的新需要。为了适用油气勘探开发的新要求,油藏地球物理已成为勘探地球物理的新分支,其实质是在提高地震勘探分辨率的基础上,综合地球物理测井等手段,采用多种反演方法,将对地下油气藏的研究从大尺度的油气圈闭提高到小尺度的油气储集层,从描述储层的形态提高到对储集层参数(孔隙度、含油气饱和度、渗透率)的估算。据此,将发展高分辨率的三维及四维地震勘探技术、多波多分量地震勘探技术、跨井或环井的层析成像技术及综合地球物理测井技术。

目前推出的和正在发展的新技术主要有以下几种。

(1) 千道地震仪 这种仪器在于提高时间域和空间域的采样率,缩小检波器之间间距,从而达到提高分辨率和确保资料精度的目的。

(2) 三维地震技术 把检波器布置在一定面积上(而不是一条测线上)进行采集,达到增加覆盖次数,提高资料信噪比,查明复杂地质体的空间分布,是目前详查复杂构造,弄清小断层展布的最好技术。

(3) 多波勘探 在野外同时记录横波、转换波和纵波,进行综合解释,可以研究岩石物理参数,便于进行储层预测和油气检测。

(4) 信噪分离新技术 这项技术是在地震资料处理时把有效波与噪音分离开,其思路是把信号与噪音进行线性变换,由于二者统计特征不一样,前者在变换后呈非高斯化,后者呈高斯化。在重、磁、电资料处理时可把区域异常与局部异常区分开。

(5) 叠前深度偏移技术 在叠加之前对地震记录道进行偏移归位,能显著地提高大倾角地层的成像质量。这是资料处理的一项新突破。

(6) 地震地层学 它是数字地震技术与现代沉积地层学结合的产物。在划分沉积层序基础上通过相的划分达到研究沉积环境、岩相、岩性,确定砂体、礁块、火成岩体等地质体的目的。

(7) 模型技术 它是利用人机联作终端,综合利用地震、地质、测井等资料通过计算机作正演模拟,再与实际资料作对比,经多次反复修正模型,以求得合理的解释成果。

(8) GPS 地形校正技术 在我国山区油气勘探中,地形的剧变引起物探资料解释中的构造畸变。因此,对四种物探原始资料进行地形校正时使用 GPS 仪器测量数据,结合卫星定位和原有地形图资料,可使物探资料地形校正精度大大提高。

二、发展趋势

目前在石油地球物理勘探中常用的重力、磁力、电法和地震四种方法,其理论经过 100~200 年的发展、完善,现已基本成熟。由于引进了信息论、计算机技术和现代沉积学理论,其资料的采集和处理已达到较高水平。在资料解释方面由过去单纯构造解释已跨入到沉积环境、岩相、岩性解释。今后的发展趋势是,在采集和处理的方法上尽量引进前缘科学研究成果,使资料的信噪比、分辨率、保真度不断提高,便于在工作站上进行解释,向直接找油找气方向发展,特别是向薄互层油气检测方向发展。目前我国中生代地层油气勘探中,由于勘探程度较高,那些大而肥的油田已基本查明,剩下的是那些“小、深、薄”的油层等待我们去寻找。因此,地球物理工作者必须在资料采集、处理的工作方法上下功夫,以提高第一性资料的精度。在地球物理勘探的理论和研究方法研究方面,将主要集中在下列方面:①沉积盆地演化的定量模拟解释;②条件复杂地区的三维地震采集处理和地层型及岩性型油气圈闭的直接识别;③油气藏及油气储集层的地震描述和开发过程中的动态监测;④小尺度地质异常体和地层精细结构的成像理论和方法研究。

在地球物理勘探方法和技术的研究方面,将主要集中在下列方面:①改进野外采集装备的技术水平,如地震勘探中多波多分量信号采集方法和设备的研制,重力、磁力、电法、放射性及测井等技术装备的更新换代。②地震、电法、重力、磁力、放射性勘探及测井等反演方法的研究,其中多种测量资料的联合反演尤其重要。③进行岩石、矿物各种物理性质的实验测定研究。

第三节 重力勘探

一、重力勘探在油气勘探中的作用

石油和天然气属于沉积矿产,它的生成和聚集是有一定的沉积环境和构造条件的。重力勘探资料对于研究这些问题是十分有益的。利用小比例尺(1:100 万~1:50 万)的重力勘探资料可以研究区域地质构造,划分构造单元,在沉积覆盖区快速经济地圈定出油气远景盆地的范围。例如在未经勘探的新地区开展区域性的地质普查,以确定是否存在值得进一步调查的足够大的沉积盆地和足够厚的沉积地层。大多数沉积岩的密度都小于基底岩石的密度,因此,凡是满足这种条件的地区,都可以根据密度差查明界面并且确定沉积盆地的大致厚度和分布。在海水覆盖的大陆架地区的早期勘探中重力资料特别有用。

用中等比例尺(1:20 万~1:10 万)的重力异常资料可以划分盆地内的次一级的构造,进一步地圈定出有利于油气藏形成的地段,寻找有关的局部构造,例如地层构造、古潜山、盐丘、地层尖灭和地层封闭等。利用高精度的重力测量还可以查明与油气有关的局部构造细节。

二、重力勘探原理

重力勘探是以地壳中不同岩矿石之间的密度差异为基础,通过观测和研究天然重力场的变化规律以查明地质构造和矿产分布的一种物探方法。在重力勘探中期望测量到地下地质体的密度不均匀性(即密度异常),由密度异常的分布来推断该地质体在地下的界面形态和空间位置。地质体的密度差异是指该地质体的密度 ρ 与其周围地层岩石密度 ρ_0 的差值,即, $\Delta\rho=\rho-\rho_0$, $\Delta\rho$ 称为剩余密度。在野外我们无法直接测量剩余密度 $\Delta\rho$,但是,由牛顿万有引力定律知,密度与重力加速度 g (在重力勘探中简称为重力)有密切的关系。当地层岩石的密度在横向上发生变化时,重力 g 也随之发生变化。重力的变化在地面或空中是可以直接用仪器进行测量的。因此,在重力勘探中人们是通过直接测量重力的变化来了解地层密度的变化,进而推断地质体在地下的展布情况。

三、重力勘探仪器与野外工作方法

原则上说,与重力有关的物理现象都可以用来测量重力值。根据测量物理量的不同,重力测量分为动力法和静力法。动力法是测量物体的运动状态(时间和路径),用以确定重力的全值(绝对重力值);而静力法是观测物体的平衡状态,用以确定两点间的重力差值(相对重力值)。通常所称的重力仪就是这种测量相对值的仪器。在重力勘探中,重力测量的精度应达到重力全值的 $10^{-7}\sim 10^{-9}$ 量级,因而重力仪是一种十分精密的仪器。

重力野外测量应按一定的测网和一定的精度要求进行。首先根据承担的地质任务进行现场踏勘并编写技术设计,以确定工作的比例尺、测网密度、精度要求、误差分配和测量路线等。由于不同的研究对象产生的重力异常不同,对同一研究对象其研究程度也有不同,因而测网密度和测量精度要求也不相同。随着研究程度的深入,测网的密度应越大,测量的精度应越高。在区域重力调查中,基本比例尺有1:100万、1:50万、1:20万和1:10万等四种。前两种主要用于重力调查的空白区,用以研究区域构造和地壳深部构造;后两种主要用于能源普查。当对沉积盆地进行深入的研究时,如基底断裂分布、寻找古潜山等局部构造,可采用1:5万或1:2.5万的比例尺。

由于重力仪本身存在着无法消除的零点漂移,随着观测时间的延长,零点漂移积累愈大,且往往不是与时间呈线性关系。因此,用重力仪在测点上观测时,需要有一些精度更高、重力值已知的点来控制。这些点称为基点。重力基点在观测时都要联成封闭的网络,称为基点网。任一测段的重力普通点观测均应从基点开始,并终止于基点。基点网的作用是,控制重力普通点的观测精度,避免误差的积累;检查重力仪在某一段工作时间内的零点漂移,确定零点漂移的校正系数;推算全区重力测点上的相对重力值或绝对重力值。

普通点是测区内为获得被测对象产生的重力异常而布置的观测点,在普通点上一般可采用单次观测,但都必须在规定的时间内(即最大线性时间间隔)起止于基点上。

四、重力勘探资料处理

从野外观测到的资料需经过一系列的整理才能获得重力异常,这些整理包括初步整理和异常计算两部分。初步整理的目的是求得消除仪器零点漂移之后各测点相对于基点的相对重力值。这个相对值包含了地下密度不均匀、地形、高度和纬度等因素的影响,因此,必须消除与密度因素无关的影响,这一过程称之为异常校正。对测量值进行地形校正、布格校正和

正常场校正后的重力异常称为布格重力异常，它是油气勘探中使用最广的一种重力异常。

校正后的布格重力异常仍然存在一定的误差，且是多种地质因素产生异常的叠加。因此，需要进一步消除各种校正时引入的一些偶然误差，消除那些与勘探目的无关的某些近地表小型密度不均匀体的干扰，从叠加的异常中划分出与勘探目标有关的异常，最后进行位场转换以满足解反演问题的需要。

数据处理的内容包括重力异常的平滑，去掉偶然误差；重力异常的划分，从叠加的异常中划分区域异常和局部异常；位场转换，由观测平面上的重力异常值 Δg 换算成同一平面上重力位场的各阶导数等。

五、重力勘探资料的地质解释与应用

重力异常包含了丰富的地质信息，要想获得对异常的地质解释，需做如下工作：① 检查用于解释的重力异常资料是否可靠，是否满足研究地质目标的精度要求。② 分析工区内不同研究对象之间的重力异常的差异。③ 从区域地质环境入手，先把握全局，对重力异常进行分区（分类），研究各区异常特征与区域地质环境的内在联系。然后深入到局部，研究各区内的局部异常与地质因素的关系，即从面到点的认识过程。④ 由已知到未知。相近的地质条件产生的重力异常具有相似的特征。利用露头区的异常特征去推断邻近覆盖区的异常成因，或者利用少量的钻井资料及地震资料解释结果，去推断周围条件相似地区的重力异常解释。⑤ 重力异常具有多解性，应尽可能地收集工区内相应的地质、钻探、物性和其他勘探资料，以减少重力异常解释的不确定性。⑥ 利用正演技术，对重力异常的初步解释结果进行模拟验证，以提高解释结果的可靠性。

第四节 磁法勘探

一、磁法勘探原理及其在油气勘探中的作用

磁法勘探是观测地壳内部各种岩（矿）石之间因磁性差异而引起的磁场变化，以查明地质构造和矿产分布的一种物探方法。按观测仪器所处空间位置的不同，磁法勘探可分为地面磁测、航空磁测、海洋磁测和井中磁测四类。磁法勘探资料可用来研究区域地质构造，预测成矿远景区，勘查含油气含煤构造，寻找大型磁铁矿床。

由于大部分沉积岩磁性非常小，在地面观测到的磁场变化都是由基底的地形或岩性变化或者由火成岩侵入体所产生。因此，在油气勘探的普查中，磁测资料主要用来研究结晶基底的起伏、结晶基底的结构，确定沉积盆地的范围，圈定深大断裂和火成岩活动地带。用高精度光泵磁力仪测量，可研究沉积岩结构或直接寻找油气田。

磁法勘探是通过观测和分析岩（矿）石的磁性差异及磁场特征，来研究地质构造及其分布形态和寻找矿产。

1. 地球的磁场

在地球内部及其周围存在着磁场，称为地磁场。地磁场是一个矢量场，分布范围广，从地核到空间磁层边缘处处有分布。地磁场的分布、变化规律及起源等问题属地磁学研究的范畴。根据地磁学的研究结果，地球磁场具有下列主要特征。

（1）地磁场近似于置于地球中心的磁偶极子的磁场，它具有两个极：在地理北极附近的

磁极称为磁北极（具 S 极性）；在地理南极附近的磁极称为磁南极（具有 N 极性）。这个磁偶极的磁轴与地球自转轴相交于一个角度 $\theta_0 = 11.5^\circ$ 。

(2) 地磁场是一个弱磁场，在地面上的平均强度约为 $0.5 \times 10^{-4} \text{T}$ 。

(3) 地磁场是由不同来源的磁场叠加结果，主要由两大部分组成：一部分是来源于地球内部的稳定磁场；另一部分是来源于地球外部的变化磁场。变化部分的磁场比稳定部分的小得多，最大变化（磁暴）也只占地磁场强度的 $2\% \sim 4\%$ 。因此，地磁场的主要部分是稳定的。

(4) 稳定磁场部分除偶极子场 T 外，还有大陆磁场 T_M （非偶极子场）和异常磁场 T_a 。大陆磁场来源于地表以下磁化率高于地球平均磁化率的那部分物质。异常磁场来源于地壳中岩石的磁化，它属于局部现象。偶极子场与大陆磁场之和称为基本地磁场，在磁法勘探中又称其为正常场。

(5) 地球的基本磁场不是恒定的，而是随时间缓慢变化的，这种变化称为基本磁场的长期变化。

2. 磁法勘探中的磁异常参数

地磁场 T 是正常场 T_0 与地壳中岩石磁化形成的异常磁场之 T_a 和： $T = T_0 + T_a$ 。在地磁学中，正常场值是确定的，磁异常的意义也是明确的。但在磁法勘探中使用的是相对磁异常。在以找矿为目的的地面磁测中，常在矿体引起的异常外围选一个点（称为基点），以此点的磁场值为正常场；对于以研究区域地质构造为目的的大规模航空磁测或海洋磁测，有时在进行过正常磁场梯度校正后，以测区内磁场的平均值作为正常场值。

在应用中，人们不直接测量 T ，而是测量它的某个分量。在地面磁测中，通常测量 T 垂直分量的相对变化，即垂直磁力异常。在航空及地面高精度磁测中，通常测量 T 的模值 T 。

3. 岩石的磁性

磁法勘探的物性基础是岩石的磁性。研究和掌握岩石的磁性还有助于更好地进行地层对比、确定岩石的年代、再造地壳的运动过程等。岩石最重要的磁性是它们的磁化率。根据大量岩石标本（包括火成岩、变质岩和沉积岩）的实验室测定数据表明，火成岩和某些变质岩一般都具有比沉积岩高的磁化率。但是它们的变化范围太大，仅靠磁测资料是难以辨别岩石类型的。一般来说，沉积岩的磁化强度非常小，因此，很难用磁力剖面来反映沉积剖面内的构造特征。

二、磁法勘探仪器与野外工作方法

磁场的测量分为绝对测量和相对测量。相对测量是测定不同点之间的地磁要素的差值。在找矿和研究地质构造的磁法勘探中，只需测量相对值，相对测量比绝对测量简单一些。

目前油气勘探中均采用电子式磁力仪。电子式磁力仪有磁通门磁力仪、核子旋进磁力仪、光泵磁力仪和超导磁力仪四种。磁通门磁力仪又称为磁饱和式磁力仪，五六十年代广泛应用于我国的航空磁测，地面和井中磁测中也有应用。核子旋进磁力仪主要用于航空磁测和海洋磁测，其精度为 1nT ，我国于 60 年代开始使用。光泵磁力仪和超导磁力仪是 60 年代新发展起来的高灵敏度仪器，前者的灵敏度高达 0.01nT ，后者高达 10^{-6}nT 。这类仪器除可用于磁法勘探外，还可用于地磁绝对测量、国防磁探测以至宇宙磁探测。我国在 80 年代初开始在石油航磁中采用光泵磁力仪。

地面磁测的野外工作方法与重力勘探的基本相同。首先根据地质任务，确定磁测精度、仪器类型和磁测比例尺（测网大小）。含油气盆地一般以弱磁异常为主，因而应尽量采用观测精

度较高的仪器。研究含油气盆地的区域地质构造时,常采用1:100万至1:20万比例尺的面积测量;研究沉积岩局部构造时采用1:5万比例尺的面积测量较多,或者用更大的比例尺。测线原则上垂直于测区内测量对象的走向或构造走向,有利于测量地质引起的磁场特征,受方位角的影响较小有利于计算基岩的深度。在油气勘探中地面磁测应用较少,主要使用航空磁测和海洋磁测。

三、磁法勘探资料处理

磁力仪的测量值反映的是测点对磁场起作用的一切因素的总和。我们需要的仅是反映地壳内磁性差异的磁异常图,因此,必须对观测结果进行各种校正和处理。随着仪器的不断完善,校正工作越来越少。但对观测结果进行日变校正和正常场校正是必需的。

在对磁测结果进行地质解释之前,还需对校正后的结果进行必要的处理,压制干扰异常,突出有效异常。常用的处理方法有以下几种。

(1) 压制干扰 磁异常受人工设施或浅部磁性体的干扰比较明显,尤其是用于油气勘探中的高精度磁测,为确保解释结果正确,必须对这些干扰进行压制。

(2) 延拓计算 把观测面向上延拓,消除浅部磁异常的影响;向下延拓,增强异常的清晰度和分离叠加异常。

(3) 导数换算 为了消除区域背景磁异常的影响和确定磁异常体的边界,需要计算出磁异常的二次导数图。

(4) 垂向地磁极 将斜磁化的异常图转换为垂向磁化的异常图。在垂向磁化下,磁异常的形态及其与磁性体的对应关系比较简单,便于地质解释。

(5) 计算磁源重力异常 将磁异常通过泊松公式转换为“磁源重力异常”,将该异常图与重力异常图对比,可以利用更多的信息来判断磁异常的性质。经资料处理后的成果形式是能用于地质解释的磁异常等值图。

四、磁法勘探资料的地质解释与应用

磁法勘探资料的解释是指,根据磁测资料、岩(矿)石的磁性资料以及地质和其他物化探资料,运用磁性体磁场理论和地质理论解释并推断引起磁异常的地质原因及其相应地质体的空间赋存状态、平面展布特征、矿产和地质构造分布的全过程。磁测资料地质解释的一般步骤包括磁测资料的预处理和预分析,磁异常的定性解释、定量解释,地质结论和地质图示。

磁测资料的预处理和预分析是使解释工作建立在资料完整、可靠和使用方便的基础上。解释开始之前分析磁测精度、测网密度、系统误差和正常场选择的合理性和正确性。

磁异常的定性解释包括两个方面。其一是初步解释引起磁异常的地质原因,其二是根据实测磁异常的特点,结合地质特征,运用磁性体与磁场的对应规律,大致判断磁性体的形状、产状及其分布。

磁异常的定量解释是补充定性解释的结果,它的目的是根据磁性地质体的几何参数和磁性参数的可能值,结合地质规律,进一步判断场源性质,提供磁性地层或基底的几何参数(埋深、倾角和厚度)在平面或剖面上的变化关系。

地质结论是磁异常地质解释的成果,它是磁场所反映的全部地质情况的归结,是由定性和定量解释所得出的地质推论。地质图示是磁法工作成果的集中表现。磁法勘探的成果应尽可能地用图件的形式反映出来。如推断的地质剖面图、地质略图、矿产预测图等。在油气勘

探中磁测资料用于研究下列地质问题。

(1) 结晶基底内部构造研究 研究结晶基底内部构造对地台区大地构造分区具有重要意义。已有的研究表明, 沉积盖层的构造单元与基底内部构造间具有一定的规律性。

(2) 结晶基底起伏形态研究 结晶基底是经过强烈的褶皱和变质作用的岩层, 存在大量的岩浆体, 在被披盖上沉积盖层以前, 结晶基底已遭受了长期的风化侵蚀, 结晶基底内很多孤立的、具有陡立产状的磁性岩体顶面被削平, 出露在基底表面, 构成结晶基底表面的一部分。因此, 直接研究这些孤立磁性体顶面的深度便可了解结晶基底表面的起伏形态。

(3) 间接寻找二级构造带 大部分油气藏都在沉积盖层中, 多数沉积盖层构造与基底构造、断裂活动, 甚至火成岩活动有关。因此, 通过磁测资料研究结晶基底可间接地寻找沉积盖层构造。

(4) 圈定含油气远景区 利用磁测资料圈定含油气远景区是在对磁场特征、深度图及区域构造略图分析的基础上进行的。在深度图和构造图内寻找长期发育的深拗陷区及边部所圈出二级长垣和局部隆起, 然后结合油气显示情况圈定含油气有利地区。

(5) 直接寻找沉积岩构造 光泵磁力仪的出现, 使磁测精度提高了一个数量级。有些地区沉积岩具有弱磁性, 可被其探测到。高精度磁测可以直接用于研究沉积岩构造。目前我国石油航磁已由研究区域构造为主转入研究沉积盖层为主。

第五节 电法勘探

电法勘探(简称电法)是以岩石、矿石的电性差异为基础, 通过观测和研究天然的或人工的电场或电磁场的空间和时间分布规律来勘查地质构造和寻找有用矿产的一类勘探方法。在电法勘探中, 利用岩石和矿石的电学性质主要有: 电阻率、电导率、介电常数和极化特性。自然界中任何一种地质体都或强或弱地具有这几种电性。人们可以单独利用其中的一种性质, 也可以同时利用多种电学性质, 以便从不同的侧面了解和研究地质体。

一、电法勘探在油气勘探中的作用

在油气区域普查中, 电法用于研究区域构造, 确定沉积盆地基底起伏, 圈定含油气远景区。在火成岩、碳酸盐岩覆盖地区和地震地质条件比较复杂、难以取得良好地震记录的地区, 电法勘探是地震勘探的一种补充。在条件有利时, 电法可以确定水平层状构造、垂直构造等。虽然电法勘探的方法很多, 但在油气勘探中主要有: 直流电测深法(VES)、大地电磁测深法(MT)、可控源声频大地电磁测深法(CSAMT)、频率测深法(FS)、瞬变电磁测深法(TEM)以及激发极化法(IP)等。本节介绍前两种基本方法。

二、直流电测深法

直流电测深法是根据岩石和矿石导电性的差异, 在地面上不断改变供电电极和测量电极的位置, 观测和研究所供直流电场在地下介质中的分布, 了解测点电阻率沿深度的变化, 达到测深、找矿和解决其他地质问题的目的。

1. 岩石的电阻率

岩(矿)石的导电性通常用电阻率 ρ 或电导率 $\sigma=1/\rho$ 来描述。它是电测深法的基础。电阻率越低, 物质导电性越好; 电阻率越高, 物质的导电性越差。电阻率的单位为欧姆米($\Omega \cdot$