

石油地球物理勘探基本知识

石油化学工业部石油地球物理勘探局技术学校编

石油化学工业出版社

内 容 提 要

《石油地球物理勘探基本知识》主要介绍重力勘探、磁法勘探、电法勘探及地震勘探的基本原理、野外工作方法、仪器结构特性和资料解释等。

主要供石油物探技工学习阅读，也可供有关专业工人参考。

石油地球物理勘探基本知识

石油化学工业部石油地球物理勘探局技术学校编

石油化学工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路15号)

燃料化学工业出版社印刷二厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 $5 \frac{7}{8}$
字数 128 千字 印数 1—9,550
1976年1月第1版 1976年1月第1次印刷
书号15063·油36 定价 0.42 元

引 言

我们的祖国是一个土地辽阔而富饶的国家，矿产资源丰富，尤其是石油，已经查明有丰富的蕴藏量。由于石油在工业上的重要性，人们常常把它叫做“工业的血液”。石油的用途日益广泛这是人们所熟悉的，但是它埋藏在什么地方？怎样才能找到它？这是大家还不够熟悉的，这个光荣而艰巨的任务，就是石油勘探工作，通常叫做“找油”。寻找石油的方法很多，有地质的和地球物理的方法。在地球物理方法中又分重力、磁法、电法和地震勘探等方法。在生产实践中，这些方法之间既互相联系，又各有其自己的特点。

有的同志在野外工作中常碰到一些热心的群众，看见我们用仪器在地面上观测的时候，往往就要问道：“同志！你用这个东西能看见石油吗？”对于这个问题，我们就需要作一番解释，说明地球物理方法目前还是个间接找油的方法，是寻找在地面以下适合于石油储藏的地质构造。

我们所研究的对象是地球，而与人类生活、生产关系最密切的还是它的外圈。地球的表层是由岩石组成的，叫做“岩石圈”-厚度有几公里到几十公里，又称为“地壳”。在漫长的地质年代中，地壳发生了巨大的变化，大海变成了陆地，又变成高山，所以中国古代劳动人民就有“沧海桑田”之说。地壳在不停地运动中改变着地质结构，也改变着地球的面貌。正是由于这种运动，产生了各种矿藏，我们要用地球物理勘探方法来寻找适合于石油储存的地方——油、气藏。

岩石，也是一种物质。它有着自己的特性，如密度、磁性、导电性、弹性等等，这些就是岩石的物理性质（岩石的化学性质我们在这里就不介绍了）。不同的岩石，它的物理性质也不相同。石油地球物理勘探就是利用岩石的这种特性来探寻适合储集油、气的地质构造或圈闭。

在一般的情况下，地表都被近代沉积所覆盖，要了解覆盖层下面的地质构造情况，就要使用地球物理勘探方法。

目 录

引 言	
第一章 重力、磁法及电法勘探	1
第一节 重力勘探	1
第二节 磁法勘探	25
第三节 电法勘探	48
第二章 地震勘探	77
第一节 地震勘探反射波法的简单原理	77
第二节 地震勘探仪器	98
第三节 地震勘探的野外工作	118
第四节 地震勘探的资料解释	138
第五节 地震勘探技术发展现状	175
结束语	181

第一章 重力、磁法及电法勘探

第一节 重力勘探

重力勘探法是根据地壳内部各种岩石密度不同在地表引起的重力变化，来解决有关地质构造和矿产分布等问题的一种勘探方法。

那么，重力是怎样产生的呢？

我们都知道，地球是在宇宙空间里永不停息地转动着的，人类生活在地球上随时都在受着它的吸引力。人们在地面上走来走去，为什么没有人飘起来也没有人掉到地球以外的空

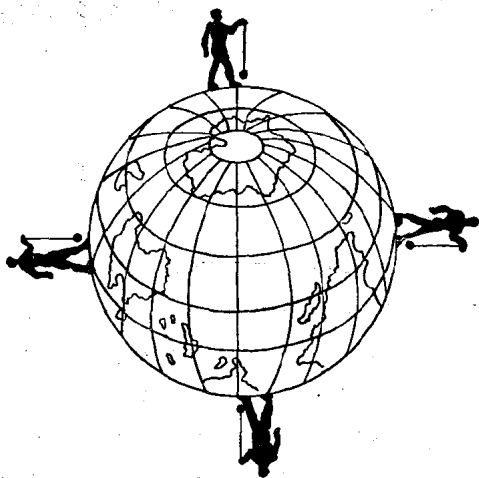


图 1-1

间去呢？这是由于地心吸引力作用的结果(见图1-1)。如人手中用线提一个重球，不论你站在地球上任何一个位置上，这根线都是铅直垂向地面的。又如人手中拿一个茶杯，把手一松杯子就会自然地落在地面上。从这些日常生活中司空见惯的现象说明，我们并没有给这些东西以外力，它们都是自己落向地面。这说明地下有一种力在起作用，这个力就是地球的引力，力的方向大致指向地心。地球除去引力以外，还有离心力。任何一个作圆周运动的物体都有离心力产生，现在

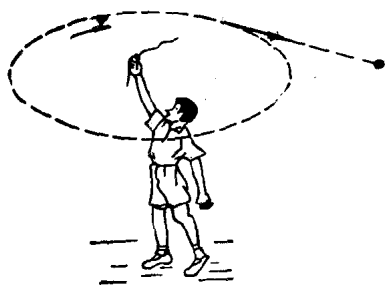


图 1-2

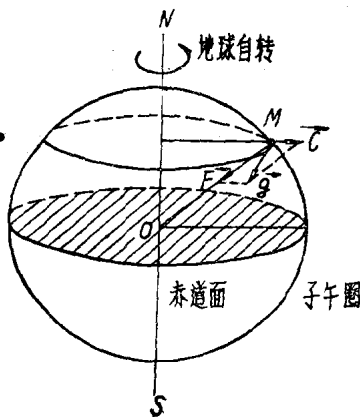


图 1-3

我们作一个实验(图1-2)，绳子的一端拴上一个小铁球，另一端用手拉住并旋转使它作圆周运动。一旦把手松开或者绳子断掉，小球并不立即落在地上，而是沿着圆圈的切线方向向远处飞去。这就说明有一个使它向外的力量。还有当你坐在汽车上车子急转弯时，人们不由自主地向外侧倒去。这些现象都说明了离心力的作用。地面上任何一点都受地球的引力和离心力的作用。这两个力作用在单位质量上的向量和叫

做重力。图 1-3 中，假设地面上有一个单位质量的质点 M ， F 为地球对它的引力， C 为地球自转对它产生的离心力， g 为两个力的向量和，称为重力。用公式来表示为：

$$\vec{g} = \vec{F} + \vec{C}$$

由于引力比离心力大得多，离心力只有重力的 $1/288$ ，所以它们的合力（ g 的方向）仍可以看作大致是指向地心的。因此，引力的变化是引起重力变化的主要原因。这个重力便是我们重力勘探所要研究的对象。

1. 什么叫重力和重力异常

宇宙中任何物体之间都是有吸引力的，这种力，是英国科学家牛顿（1643~1727）所提出来的万有引力。万有引力有多大呢？假设有两个质点 m_1 和 m_2 （图 1-4），两个质点之间的距离为 r ， F 为质点间的引力，其大小与质点质量的乘积成正比，与距离的平方成反比，用公式表示则为：

$$F = f \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

式中 f 为万有引力常数。由实验结果知道，质量各为 1 克的两个物体，相距为 1 厘米时，它们之间相互的吸引力

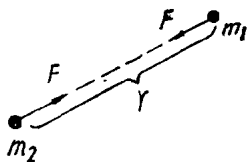


图 1-4

为 $1/15,000,000$ 达因。当万有引力公式中质量用克、距离用厘米、力用达因为单位时，则万有引力常数：

$$f = 1/15,000,000 \text{ 厘米}^3/\text{克} \cdot \text{秒}^2$$

由于重力的作用，当物体自由下落时，将产生加速度，这个加速度叫做重力加速度。它与重量之间的关系为

$$F = m \vec{g}$$

式中 m 为物体的质量， g 为在重力作用下，当物体自由下落时所产生的加速度，即重力加速度。地球上各点的重力加速度与质量 m 是有关系的，为了便于研究，规定了统一标准，

以单位质量的重量为标准，即 $\frac{F}{m}$ 。

单位质量在某一点的重量叫做该点的重力场强度，简称场强。凡受重力作用的空间都叫做重力场。从理论上讲，重力场作用的空间是无限的，而实际上随着距离的加大，重力作用就十分微弱以致可以忽略不计了。

在重力勘探中，常把重力加速度或场强叫做重力，实际上是一回事，只不过一个是从加速度的概念，一个是从力的概念出发而已。为了纪念第一个测量重力加速度的意大利科学家伽利略（1564~1642），把重力加速度的单位叫做“伽”。因为重力加速度的变化很小，用“伽”为单位太大，为了使用方便，采用千分之一“伽”为单位，叫做“毫伽”。

$$1 \text{ 毫伽} = \frac{1}{1000} \text{ 伽}$$

我们就是利用地壳各地重力的变化情况来研究地质上的某些结构，以寻找有利于石油储存的地方。

实际上问题还远不是这么简单，影响地面重力值变化的原因很多，主要有以下几个方面：

- 1) 地球不是一个圆球体，而是一个两极半径短、赤道半径长的椭球体；
- 2) 地球围绕一定的轴自转；
- 3) 地球表面是起伏不平的；
- 4) 地壳密度分布是不均匀的。

我们所要研究的就是最后的一个因素。由于地壳质量不均匀所引起的重力变化与构造运动是有关系的，也就与找油有关系了。下面我们要引入一个量——密度。

密度也叫做比重。1立方厘米的水在4℃温度下的重量为1克，其它物体同体积情况下与水重量的比叫做该物体的密度或比重，单位是克/厘米³，用希腊字母“ σ ”（读作西格玛）。地壳的岩石是由颗粒大小不同、化学成分不同、致密程度也不相同的矿物组成的，其密度差也是很悬殊的，它们在地壳上的分布也很不均匀，这是引起重力变化的原因之一，如果我们把引起重力变化的其它因素排除掉，剩下的便是我们所需要研究的对象了。

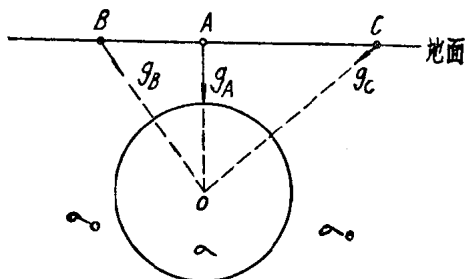


图 1-5

当地面以下有隆起的局部构造存在时，密度较大的老岩层向上隆起，由于离地面近，其重力值就比周围岩层要高些，如图1-5所示。假设均匀球体密度为 σ ，周围岩层的密度为 σ_0 ， $\sigma > \sigma_0$ 的情况下，地面上A点离球体最近，所以重力值最大，B点其次，C点较远，重力值也较小。实际上还不只是矿体本身密度大小的问题，还在于矿体与围岩的密度差，两者相差越大，重力变化就越明显。一般来说沉积岩的密度

较小，火成岩、变质岩的密度较大，矿石的密度就更大了(参阅下面的常见岩石密度表)。

岩石名称		密度 (克/厘米 ³)	岩石名称		密度 (克/厘米 ³)
沉积岩类	砂岩	1.8~2.8	火成岩类	花岗岩	2.5~3.1
	页岩	2.7~2.8		安山岩	2.5~2.8
	石灰岩	2.3~3.0		玄武岩	2.7~3.2
	石膏	2.7~3.0		橄榄岩	2.6~3.4
	盐岩	2.1~2.2			
变质岩类	片麻岩	2.4~2.9	矿石	赤铁矿	4.9~5.3
	石英岩	2.6~2.9		磁铁矿	4.9~5.2
	大理岩	2.6~2.9		黄铁矿	4.9~5.2
				铬铁矿	4.6~4.9

实际上同一类的岩石在自然界中由于所处的条件不同，其密度也不一样。研究一个工区的岩石密度工作，常由专业的“岩石物性队”来完成，他们采集各种岩石标本，用专门的仪器来测量它们的密度，提供本地区岩石密度数据。

上面我们简单地说明了岩石密度不均匀时可以引起重力变化，我们就利用岩石的这种密度差来进行重力勘探，也就是寻找重力异常。

要想得到仅由于地壳密度不均匀所引起的重力变化，必须知道地壳在密度均匀分布的情况下重力在地面上的分布。假设地球是一个表面光滑而且密度均匀的椭球体，以一定的角速度自转着，地面上各点的重力值是可以计算出来的，这个重力值叫做正常重力值用 γ_0 表示，这种情况下的重力场叫做正常重力场。

正常重力场和重力异常是两个相对的概念，重力异常也是相对正常重力场而言的。

地球表面有百分之七十的面积被海洋所覆盖，所以大地测量规定由静止的海洋面延伸到各大陆所形成的封闭曲面，作为地球的基本形状，即一个扁球体。从地球的上述情况出发，并假设其内部岩石密度分布均匀，我们就可以从理论上推导出能大致反映地球表面各点重力大小的基本公式，用正常重力公式所算得的各点重力大小叫做该点的正常重力场。计算公式如下：

$$g = 978.0490(1 + 0.0052884\sin^2\varphi - 0.0000059\sin^2 2\varphi)$$

当两点之间的纬向距离差 1 公里时，正常重力场的变化为：

$$\Delta g_{\text{正}} = 0.812\sin 2\varphi D$$

D 为两点之间的纬向距离。

高程变化对重力场也是有影响的，每增高 1 米时，减小 0.3086 毫伽，高度变化的公式为：

$$\Delta g_{\text{高}} = -0.3086 \Delta h$$

正是由于上述原因，重力勘探中要有纬度、高程等数据。

在重力勘探中所测得的重力值总和 g ，是该点的绝对重力值。从绝对重力值中减去该点的正常重力值和地形影响，剩下的就是重力异常，用符号 Δg 来表示，单位是毫伽。在实际生产中，只要知道某些基点的绝对重力值，再测出各点与基点的重力差后进行校正。这种测量叫做相对重力测量。经过各种校正以后所得到的重力异常就是由于岩石密度不均匀所引起的异常了。

测量重力异常，还是有一定条件的，即：

1) 地质体与围岩必须有较大的密度差，而且要有较大的质量。

2) 地质体的埋藏深度不宜过大，如果埋藏过深，就不

易发现。举一个例子来说，如果有一个中心深度为 100 米，剩余质量为 50 万吨的球形矿体，在它的正上方可以引起 0.335 毫伽的异常；当球体深度增大到 1000 米时，则只能引起 0.00335 毫伽的异常，这是目前重力勘探无法发现的。

在地面观测的重力值不仅受到地球内部及地球表面的影响，而且随着时间而变化，这是由于天体对地球的引力造成的，主要是月亮和太阳，它所起的变化是周期性的，月亮引起的重力变化最大，为 0.1 毫伽，太阳为 0.05 毫伽，在不长的时间内这个变化非常小，所以在一般情况下可以忽略不计。

2. 重力值是怎样得到的

前面我们介绍了一下什么是重力和重力异常，那么，重力异常值是怎样得到的呢？这是通过使用重力勘探仪器和一整套野外工作后而获得的。首先是用重力仪按照一定的路线进行测量，现在我们就先介绍一下重力仪的基本原理及其类型，然后再介绍野外工作方法。

1) 用仪器进行观测：

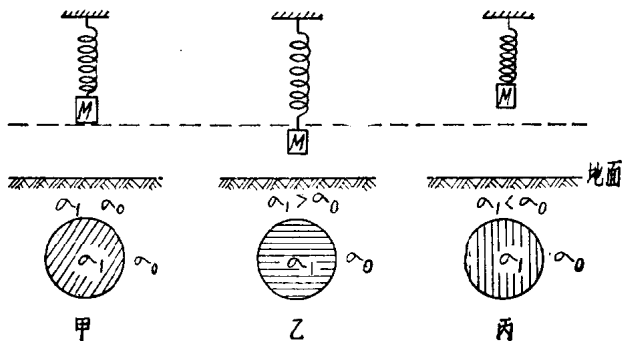


图 1-6

重力仪的种类很多，但基本原理却是一样的，如图1-6所示。假设有一根弹簧，上端固定，下端有一个重块 M ，这个重块是受地球的重力作用的。地面以下有一个球形地质体，地质体的密度为 σ_1 ，地质体周围岩层的密度为 σ_0 ，下面我们按几种情况进行分析。

(1) 当 $\sigma_1 = \sigma_0$ 时，即地质体与围岩的密度相同，没有剩余密度，如图1-6甲所示。

(2) 当 $\sigma_1 > \sigma_0$ 时，即地质体的密度比围岩的密度大，这时弹簧伸长，重块下降，重力值变大，如图1-6乙所示。

(3) 当 $\sigma_1 < \sigma_0$ 时，即地质体的密度比围岩密度小，重块上升，重力值减小，见图1-6丙。如果在第乙、丙种情况下，在一定的面积上进行观测时，就可以发现重力异常。当然，这只是一个最简单的比喻，实际上重力仪的结构是比较复杂的，工艺要求也很高，我们仅借此来说明一下罢了。

重力仪要求有较高的灵敏度，这样当重力有较小的变化时才能观测出来，要求重力有0.01毫伽的变化时，就能引起弹簧伸长量的改变。假如重力改变为 Δg ，弹簧伸长改变为

ΔL ，则用 $\frac{\Delta L}{\Delta g}$ 来表示灵敏度，这个灵敏度的要求是很高的。

曾经有人作过一个计算，有一个球形矿体（如图1-7），其密度为4.9克/厘米³，半径为50米，顶部距地面的深度为35米，矿体质量为270万吨，围岩的密度为2.9克/厘米³，由于这个矿体的存在，在地面上引的重力异常值最大约1毫伽，所以当重力变化0.1毫伽时，才能使弹簧伸长1/500,000厘米，这样微小的变化，用直接的方法是很难测量出来的，只能用间接的方法进行测量。

我国自解放二十多年来所使用的重力仪有了很大的发

展，不仅能够自己制造而且在精度上也有很大的提高。

重力仪的工作原理就是通过测定某种静力平衡体系在重力作用改变时而产生的位移来确定重力变化的。重力仪的关键部分就是弹性系统，根据弹性体的类别，可以分为以下几种重力仪：

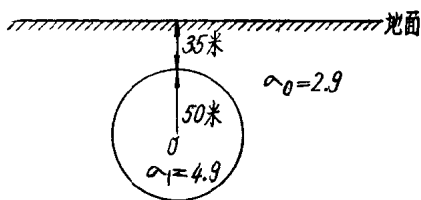


图 1-7

- (1) 气体重力仪；
- (2) 金属弹簧重力仪；
- (8) 石英丝重力仪。

由于重力勘探的高精度要求，重力仪的弹性体应满足以下三个条件：

- (1) 弹性体的弹性不随时间改变或改变极小；
- (2) 在温度改变时，弹性保持不变；
- (3) 弹性应变的大小，严格地与作用力成正比。

有许多惰性气体只能满足上述第(1)、(2)点要求，加上气体的弹性受温度影响很大，故现在一般已经不使用了，常用的是金属弹簧和石英丝，这两种材料最主要是温度补偿小，为了满足要求，金属弹簧常用弹性恒定、温度系数小的铁、镍、铬的高级合金钢。弹性系统的类型是很多的，但是大体上有以下几种形式：见图1-8。图中 L 为弹簧， M 为重块。现在举一个例子来说明（参见图1-9）为重力仪工作原

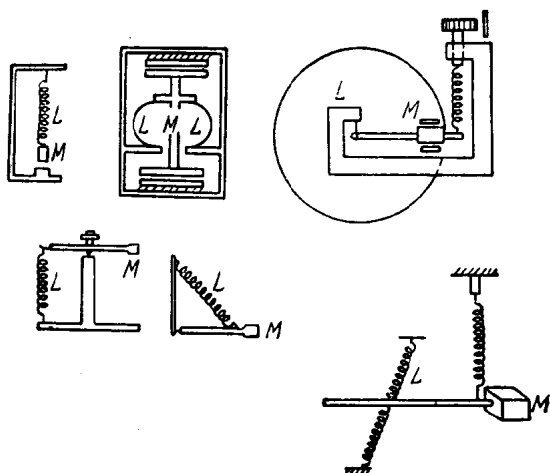


图 1-8

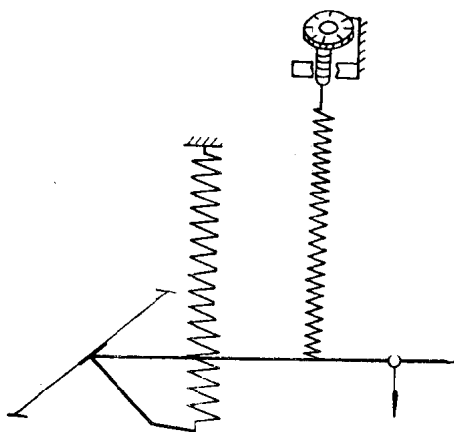


图 1-9

(图中秤杆左端点为 0)

理图。一个可以绕水平轴在垂直面内自由转动的秤杆，一端固定一个质量为 m 的重荷，重荷与转动轴之间连接两条粗细不等的弹簧，用它们把秤杆悬挂起来，构成一个特殊的弹簧秤。

从图1-9中可以看出，整个系统有两种力的作用：第一，是重荷在重力作用下对 O 轴产生的重力矩；第二，是两根弹簧伸长后对 O 轴产生的弹力矩，两者的平衡条件是：

$$M_g(\text{重力矩}) = M_s(\text{弹力矩})$$

这就是重力仪的基本平衡方程式。当由于重力变化使平衡破坏后，就通过光学系统反映出来可供观测（见图1-10）。为了

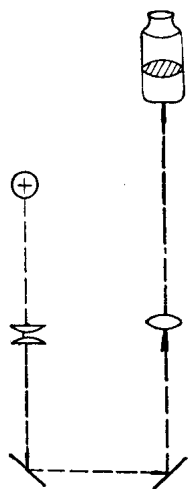


图 1-10

测得两点之间的重力变化，便转动测微螺丝改变弹簧的张力使秤杆恢复平衡，相当仪器的读数变化一格时所补偿的重力变化叫做重力仪的格值（参见图1-9）。

实际上尽管重力仪制造精密，但是弹簧仍受一些外部因素影响，当在某一点上观测之后，经过一段时间回来重新观测时，常常数值不相同，这里除去读数

误差以外，还受以下几方面影响：

(1) 重力日变。这个在前边已经谈过了，是由于其它星体与地球位置相对改变时所造成的，