

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

重力勘探应用

D.奎奥 C.普里托等著

石油工业出版社

内 容 提 要

这是一本论述重力法在石油、天然气勘探中应用的专题文集。除介绍了重力勘探基本知识外, 还以实例集中讨论了解释问题, 并对与密度、速度和孔隙率有关的概念、磁化率及异常模式的识别也进行了较为细致的阐述。

这套丛书共分十册出版, 可做为一一般地球物理勘探及地质人员的培训教材, 也可供有关院校师生参考。

D. Guion C. Priete Gravity Exploration Application

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

重 力 勘 探 应 用

D. 奎奥 C. 普里托 等著
曾华霖 译 张汝康 校

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)
轻工业出版社印刷厂排版
轻工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 10印张 242千字 印1—2,160
1985年9月北京第1版 1985年9月北京第1次印刷
书号: 15037·2560 定价: 2.15元

出版说明

美国勘探地球物理学家协会 (S.E.G.) 编写了一套培训地球物理勘探人员的教材, 我们选择了其中十册翻译出版, 供我国物探技术人员和地质人员自学进修时参考。这套书统称为《美国勘探地球物理学家协会进修丛书》, 其内容有:

《实用地震数据采集技术》

《地球物理资料数字处理》

《实用地震资料处理》

《波动方程偏移引论》

《褶积模型》

《合成声测井和地层圈闭》

《双相介质中波的传播》

《重力勘探应用》

《井中重力测量的解释与应用》

《地球物理勘探遥感原理》

今后还要从这套培训教材的新书中挑选出版

译 者 说 明

重力法是石油、天然气普查勘探的重要手段之一。

本书是一本论述重力法在石油、天然气勘探中应用的专题文集。

编著者D.奎奥 (D.Guion) 是GUION—PEARSON公司的总裁和创办人, 从事过多年的地震、重力和磁法勘探工作。另一编著者C. 普里托 (C.Prieto) 是SUPERIOR石油公司重磁勘探部门的负责人, 她在地球物理资料的处理和综合解释以及专业人员的培训方面, 都具有丰富的实践经验。

除了重力勘探基本知识外, 本书编入了由著名地球物理学家L.L.内特尔顿 (L.L.Nettleton) 等撰写的八篇论文和专题报告, 其中大部分是很有价值的科研生产成果。

本书主要内容有下列几个方面:

1. 重力勘探基础知识。
2. 美国得克萨斯州、密执安州、墨西哥湾等处油气田的重力勘探工作情况和经验介绍。
3. 美国区域布格重力异常图的地质解释。
4. 海洋重力勘探工作实例。
5. 沉积岩的物理性质 (主要是密度) 的研究。
6. 某些油气藏引起的重力效应的特征。
7. 井中重力测量的应用效果。
8. 测井基本知识。

其中, 由T.H.麦卡拉赫撰写的长达十万字的专题报告是一份难得的资料。

本书有不少经验值得我国的石油物探工作者借鉴, 其中主要有以下几点:

1. 在石油勘探工作中, 应当同时应用地震、重力、磁法、测井、电法等地球物理方法及地质学方法, 对资料必须进行综合解释。这样做, 可以发挥各种方法的长处, 有利于解决各种复杂的地质问题。

2. 应重视并加强对油气储集层岩石和围岩的物理性质的研究。物质的物性差异是物探方法得以存在的依据, 也是对物探资料进行地球物理和地质解释的基础。T.H.麦卡拉赫对美国、意大利和苏联油气田的重力资料或岩芯标本的研究, 对地下不同温度和压力条件下密度变化规律的研究以及对油气储集层本身与重力效应的直接关系的研究, 都具有重要的意义。正如T.H.麦卡拉赫所指出的那样, 美国和苏联的地球物理学家对于油气藏本身引起的小而可识别的重力效应是十分注意的。苏联B.M.别廖兹金根据油气藏本身的负剩余密度, 提出了“规格化总梯度法”, 这个方法在利用重力法直接找油气藏的问题上, 已初见成效。

3. 重力法不仅在油气田的区域普查中 useful, 在有利条件下, 还可以根据观测重力异常直接研究油气藏。由于井中重力测量具有其他测井方法所不可比拟的优点, 因而重力法在已知油田的开发和寻找未发现的“育油藏”方面, 也具有一定的价值。

原文中个别地方有漏页、漏字 (特别是数目字) 和缺少附图的情况, 译者尽力采取了补救措施。翻译过程中, 得到了许云教授及徐乃和同志的帮助, 特此致谢。

前 言

大多数重要的石油公司由地震学家、地质学家以及少数重磁专家组成。综合应用地震学、位场和地质学，对勘探工作有很大的好处。许多公司和独家经营者都了解这一点，因而在施工地区都采用综合勘探。本书的目的是帮助地震学家和地质学家了解位场的概念，更多地应用位场知识，并改进勘探程序。

本书介绍重力勘探方法的应用情况，不打算涉及重力勘探的各个方面，只集中讨论解释问题。关于野外工作方法和资料归算方面的知识，可以查阅有关的“参考文献”。应当强调，重磁资料不仅对区域普查有用；如果利用得当，在地震工作有困难或者地震工作进行得不够的情况下，这些资料还可以提高地震解释效果，作出地质上的解释。现在，重力模拟正越来越多地应用于确定岩石构造。在一定的地质条件下，重磁资料还对地震资料起着良好的定性控制作用。

在每个地质环境，物理参数是单值的，但不同地区得到的异常特征又会有一定的变化。因此，确定岩石性质，对地球物理资料的所有解释者都极为重要。

与密度、速度和孔隙率有关的概念、磁化率以及异常模式的识别，是鉴别重磁异常并对其进行分类的核心问题。它们也是把重磁资料同所有其它的地球物理和地质资料进行综合分析所必需的基本条件。

作者首先对SUPERIOR石油公司及其经理部的支持，对他们提供的地球物理资料以及允许介绍这些成果表示感谢，并对版权所有者允许复制资料致谢。本书有许多文献插图，它们说明了重力法在勘探中的应用效果。

D·奎奥 C·普里托

1980.1.3

目 录

一. 重力勘探基本原理

1. 绪言..... (1)
2. 重力勘探原理..... (1)
3. 岩石的密度..... (3)
4. 计算地质体引起的重力异常..... (4)
5. 重力解释..... (7)

二. 重力解释

1. 井中重力仪在生产中的应用和资料解释.....J. W. 布拉德利 (25)
2. 密执安州圣克莱尔的博伊德—彼得斯礁.....C. 弗里斯 (35)
3. 内华达州雷诺德河谷的石油重力勘探.....D. J. 奎奥等 (45)
4. 美国重力图.....P. L. 莱昂斯 (53)
5. 得克萨斯州布雷佐利亚县圣·路易斯·帕斯盐丘的海底重力详查.....
.....L. L. 内特尔顿 (60)

三. 密度、速度和孔隙率

1. 地层速度和密度——推断地层圈闭的基础.....G. H. F. 加德纳
L. W. 加德纳
A. R. 格雷哥里 (67)
2. 沉积岩的物质特性及油气储集层的重力效应.....T. H. 麦卡拉赫 (77)
3. 测井解释原理.....施伦贝尔有限公司 (117)

一、重力勘探基本原理

1. 绪 言

重力仪测量地球上的重力加速度。对每个测点进行纬度和高度改正后，得到的重力差值（称为布格重力异常）与地下岩石密度的变化有关。

在矿产或石油勘探中，应用重力测量作地下地质图，包括定性或定量的图件。此外，重力测量还可以用来直接计算某些大型硫化矿体的储量。

本书内容包括：(I) 重力勘探基本原理；(II) 密度的确定；(III) 重力解释。将介绍不同地质条件下的一些典型例子，它们表明重力法在勘探中得到了成功的研究和应用。

本书将着重介绍重力资料的解释及与其他地球物理、地质资料的关系，不讨论重力资料整理、重力测量仪器以及野外工作方法。

2. 重力勘探原理

(1) 测量的量和单位

重力是一种加速度。物体大约以32英尺/秒²或980厘米/秒²的加速度落到地面。为了纪念伽里略，称1厘米/秒²为1“伽”。重力加速度是重力勘探中测量的量，它的基本单位是“毫伽”。在地面重力勘探中，地球重力加速度的平均值是980000毫伽；而在井中重力勘探中，“微伽”是基本单位。地球重力加速度的平均值是980000000微伽。

(2) 反平方定律

见图1.1。

① 两个质点间的引力由下式求出：

$$F = \frac{GM_1M_2}{R^2}$$

式中

G——万有引力常数；

M₁ M₂——质点1和质点2的质量；

R——质量中心间的距离；

F——力。

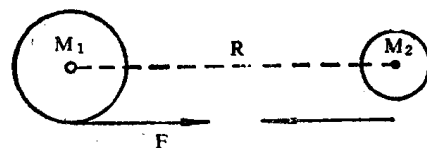


图 1.1 反平方定律

② 对M₁的引力，它的加速度a₁由下式求出：

$$a_1 = \frac{F}{M_1} = \frac{GM_1M_2}{R^2M_1} = \frac{GM_2}{R^2}$$

(注意：a₁与质量M₁无关)

③ 用矢量表示，引力为

$$\vec{a} = \frac{GM(\vec{R})}{R^2(R)} = \frac{GM\vec{R}}{R^3}$$

(3) 引力的迭加

一组质点的引力等于单个质点引力的矢量和 ($\vec{a}_T = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \dots$) (图1.2)。

(4) 引力的垂直分量

① 在重力勘探中，我们对重力的垂直分量 (a_z) 感兴趣。异常场源体的垂向深度 (在这个情况下是球心的深度) 是 Z ，因此，它对一个质点引起的重力垂直分量为

$$a_z = \frac{GM}{R^2} \cdot \frac{Z}{R} = \frac{GMZ}{R^3}$$

② 因为质量 M 等于密度 ρ 与体积 V 之积，所以有，

$$da_z = \frac{GZ\rho dV}{R^3}$$

da_z 是体积元 dV 引起的垂直加速度的增量。

(5) 复杂形体或组合体的引力

① 由许多小体积元 dV 组成的复杂形体引起的重力总垂直分量 (图1.3) 由下式求出：

$$a_z = G \int \frac{z\rho(V)dV}{R^3}$$

物体的
体 积

式中： $\rho(V)$ 是密度差，它是体积的函数①。

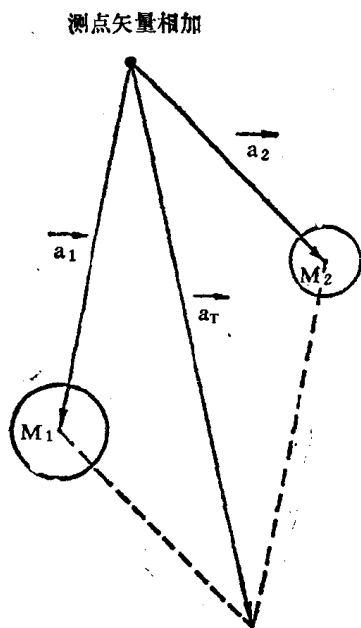


图 1.2 引力的迭加

$$\vec{a}_T = \vec{a}_1 + \vec{a}_2$$

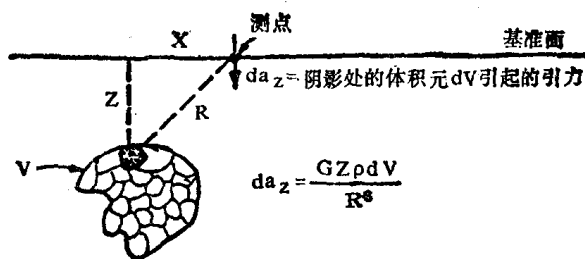


图 1.3 组合体的引力

(6) 小结

根据 (2)-(5)-① 中的公式可以看出，重力垂直分量 a_z 的数值由下列参数确定：(I) 密度分布；(II) 几何参数，例如场源体的大小和深度。这些参数的变化量是重力解释所用的概

① 密度差 ρ 应是体积元 dV 坐标 (x, y, z) 的函数，式中的密度应表示为 $\rho(x, y, z)$ 。——译注

念的根据, 将在第3和第4部分分别加以研究。

3. 岩石的密度

(1) 概述

在重力勘探中, 所求的量是与地下地质特征有关的重力在水平方向上的变化。重力发生水平方向变化的条件, 是地下物质密度在水平方向上发生变化, 例如地层的交替, 断层和褶皱等。如果地下物质成层分布, 其中不存在局部构造或地层的交替, 就不会引起局部重力异常。

(2) 岩石的密度

① 岩架●的密度

任何岩石的有效密度是各种矿物在岩石中所占体积的百分率与该矿物密度的乘积之和, 例如

$$\rho_b = \sum \rho_i V_i$$

式中 ρ_b ——有效密度;

V_i ——体积百分率;

ρ_i ——矿物的密度;

i ——矿物的顺序号。

体积百分率之和应等于1。

本节专门介绍岩石的密度及其实际确定方法。

② 带孔隙的岩石的密度

各种物质的密度不等, 空气或浅层天然气的密度接近0, 石英为2.65克/厘米³, 方解石为2.70克/厘米³, 白云石为2.87克/厘米³, 黄金为19.3克/厘米³。对于由一种岩架矿物和孔隙(孔隙率用 ϕ 表示, 是分数)中的液体组成的双组分系统, 有:

$$\rho_b = \rho_m(1 - \phi) + \rho_f \phi$$

式中 ρ_f ——液体的密度;

ρ_m ——岩架的密度;

ρ_b ——有效密度。

沉积岩的孔隙率取决于下列因素: 物质颗粒的大小和形状, 埋藏深度, 地质年代, 地质史(例如, 是否发生过变质作用或成岩作用), 颗粒大小的分选作用以及最大埋藏深度等。

侵入岩或变质岩的孔隙率常常接近零(发生破裂的情况除外)。喷出岩的孔隙率变化很大, 这取决于喷出后的沉积环境和地质史。

(3) 密度资料的实际来源

① 根据矿物成分计算

进行计算时, 首先必须把所有矿物所占比例校正为体积百分率, 然后用它乘以相应体积内矿物的密度。体积百分率之和应等于1。

② 地表取样

● 原文为Matrix, 一般多译作骨架或构架, 本书译为岩架。岩架是指孔隙性岩石的固体部分。——译注

地表取样常常是密度资料的唯一来源,在矿山勘探中尤其如此。应当小心对待下列问题:(I)正确地鉴定样品;(II)选择新鲜样品,因为它们受地表风化作用引起的孔隙率变化最小;(III)根据勘探地区的岩石处在水平面之上还是水平面之下,决定是否进行孔隙空间液体改正。

③ 电缆测井

a. 伽马—伽马密度测井

应用康普敦散射原理测量电子密度。如果钻孔情况良好,可以获得精确的有效密度值。伽马—伽马密度测井应当与井径测井共同进行分析,如果钻孔冲洗得太厉害,得到的密度值是不可靠的。

b. 井中重力仪

使用井中重力仪,可以获得天然状态下厚层岩石的非常精确的密度值,但对薄层的分辨率不好。

c. 声波测井

声波测井测量纵波的间隔传播时间(即纵波层速度的倒数),对于大多数沉积岩,能得到层速度和有效密度间的较准确的经验关系,因此,可以根据层速度确定有效密度。

d. 中子测井

由于中子测井对地层中氢气的浓度很灵敏,它可以十分可靠地确定非泥质岩石在充满液体情况下的孔隙率。但计算密度时,需要了解基岩的岩性或作出假定。天然气的存在不利于孔隙率的测定。

④ 地震速度资料

地震折射和反射纵波(P波)速度可用于确定层速度,利用层速度就可以求出有效密度。此外,可以计算出根据地震资料所确定的“已知”物体的重力值,将此重力值同观测重力值相比较,也能得出有效密度。

⑤ 重力剖面法

在地形起伏与地层构造无关的地区,用“重力剖面法”可以获得可靠的密度(图1.4)。但应指出,地形特征常常受地质因素控制,因此,这种方法可能是不可靠的。

(4) 密度差的概念

局部重力异常由水平方向的密度变化或“密度差”所引起。如果存在密度均匀的水平层,将观测不到局部重力异常。计算已知地质特征的重力值并把它同重力观测值比较,可以直接确定密度差。也可以用间接方法确定,即首先确定有效密度,然后再按下式计算:

$$\Delta\rho=\rho_1-\rho_2$$

例如,一个大型硫化矿体的有效密度为4.0克/厘米³,围岩是致密灰岩,其密度为2.7克/厘米³,则矿体的密度差是1.3克/厘米³=4.0-2.7克/厘米³。由这个矿体引起的相对重力异常观测值与密度差成比例。

4. 计算地质体引起的重力异常

从2和3节可以断定,一个地质体在下列条件下将引起可测重力异常:(I)地质体和围岩之间存在足够的密度差;(II)地质体足够大,能够引起以现有的观测精度测出的重力异常。前面介绍了确定密度差的方法,现在将讨论在密度差已确定的情况下,计算简单地质体

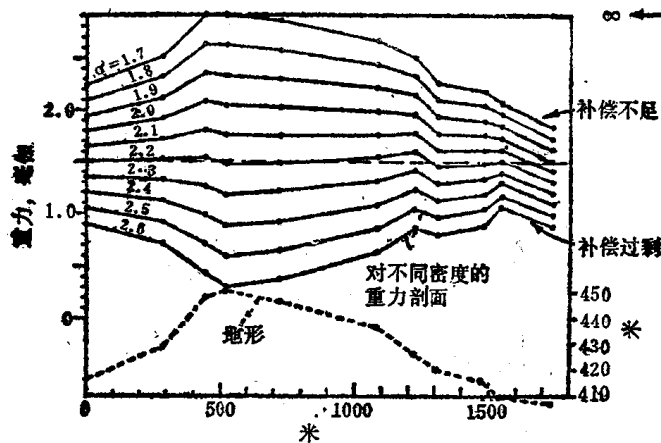


图 1.4 密度剖面
(引自内特尔顿, 1976)

上式用于计算水平范围大于深度的物体 (例如水平方向的熔岩流) 引起的重力异常。应注意: 引力与无限平板的深度无关。

(2) 二度薄棱柱

“薄”的二度体 ($t \ll z$, 即物体的厚度比深度小许多) 的重力由下式求出 (图 1.6),

$$a = 0.071 \Delta \rho t \theta$$

式中 a ——重力效应, 毫伽;
 $\Delta \rho$ ——密度差, 克/厘米³;
 t ——二度体的厚度, 千英尺;
 θ ——平面角, 度。

这个模型可用来表示背斜、地垒、地堑、河床砂岩或其他在图中显示出线性拉长的物体。

进行计算时, 物体的横截面用深度、宽度和厚度表示, 采用普通的、水平方向与垂直方

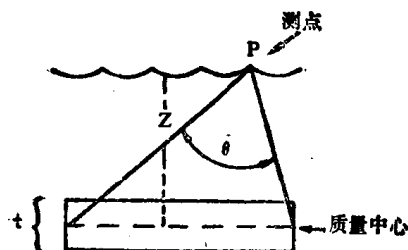


图 1.6 二度薄棱柱模型
(引自内特尔顿)

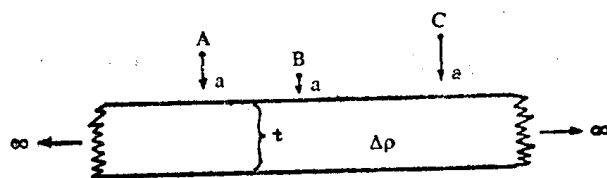


图 1.5 无限平板的重力效应

引起的重力异常问题。

(1) 无限平板

密度差为 $\Delta \rho$ 的无限平板引起的重力效应为 (图 1.5)

$$a = 12.78 \Delta \rho t$$

式中 a ——重力效应, 毫伽;
 $\Delta \rho$ ——密度差, 克/厘米³;
 t ——平板的厚度, 千英尺。

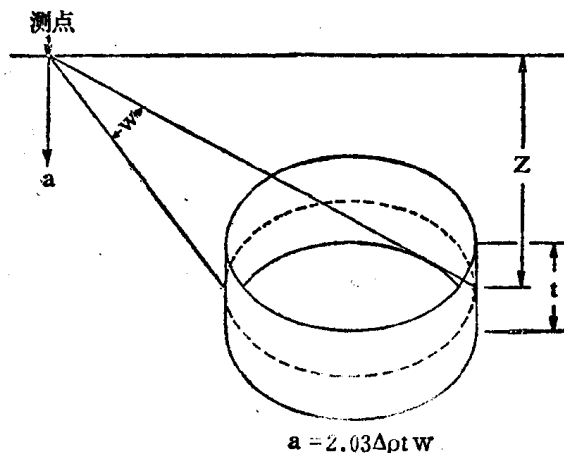


图 1.7a 三度薄圆盘重力的计算
(引自内特尔顿)

向相同的比例尺。平面角用量角器测出。

复杂的不规则形体（例如沉积岩下部的“基底”构造）的重力效应必须用计算机程序计算，这些程序利用了 (2-(5)-①.E.1) 中基本方程式的原理。

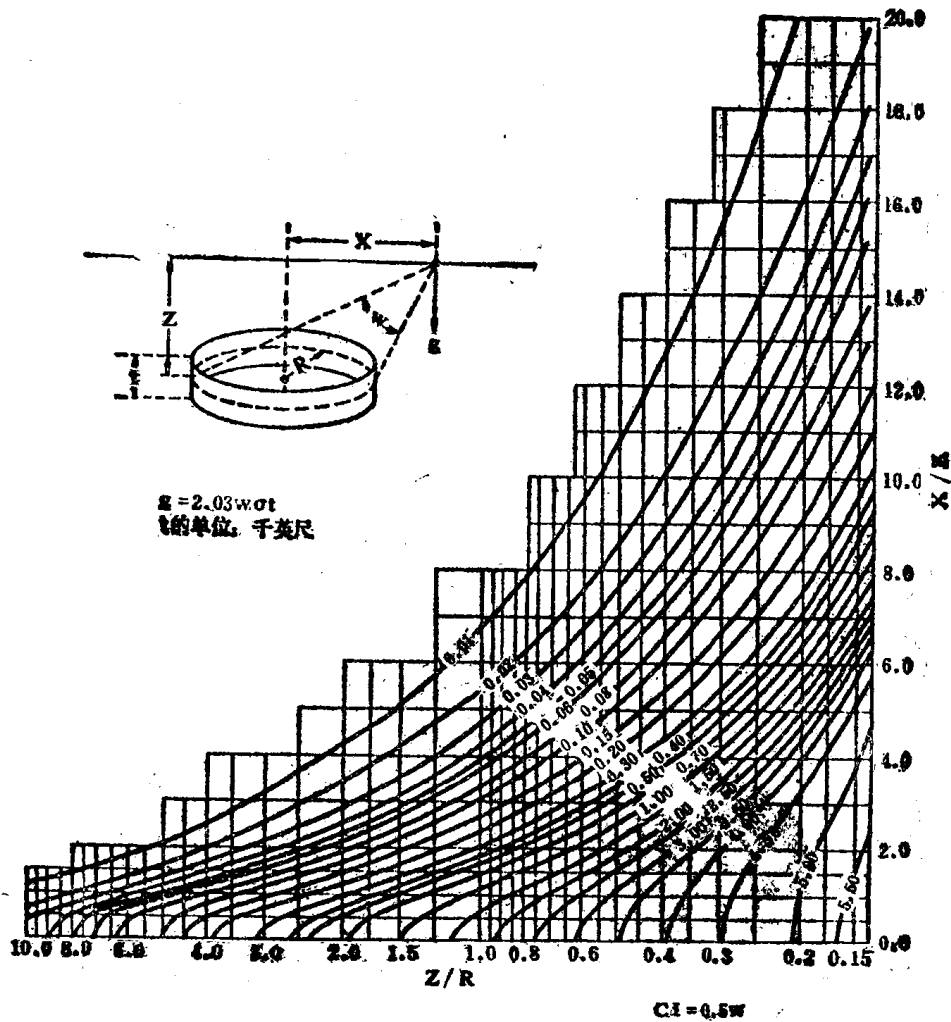


图 1.7b 水平圆盘的立体角
(引自内特尔顿, 1976)

(3) 三度模型

许多地质体在水平和垂直方向上都是有界的，而且在图中看起来大体呈圆形。这些物体可能是火成岩侵入体、塔形礁、盐丘或穹窿构造。它们的重力效应可以用“薄”圆盘模型($t \ll z$ ，即其厚度比深度小许多)近似计算。

圆盘模型对一个测点的引力为 (图1.7a)

$$a_z = 2.03 \Delta \rho t w$$

式中 w ——立体角，弧度；

t ——圆盘的厚度，千英尺；

当 $t < \frac{1}{2} z$ 时，近似良好。

计算复杂三度体的重力值必须应用数字计算机的模拟程序。

水平圆盘立体角的确定方法见图1.7b。详细情况请参阅内特尔顿：“石油重磁勘探”（英文版，1976）P 234-235。

5. 重力解释

至此，本书讨论了重力勘探的基础部分。可以看出，重力是加速度，任何地质体的重力取决于它的密度差和相对于该地质体的测点的几何参数。同时也讨论了确定密度差的方法以及简单形体引起的重力异常。

这一部分将讨论重力资料的解释，即根据重力图确定地下地质情况。最后介绍已发表论文中的几个重力解释例子。

重力解释基本上包括下列三步。

(1) 重力数据的检查

检查重力资料的目的是确定重力资料是否进行过适当的整理，测点的密度是否适合于要解决的地质问题。应当考虑选择适当的布格改正密度，进行适当的地形改正，检查等值线图的正确性和总的测量精度。

(2) 确定“剩余”重力异常

经过适当改正，重力数据换算为“布格”重力异常。布格重力异常包含了结晶基底、沉积岩的构造和岩性以及地壳中其他因素的迭加效应。重力解释的第二步就是从布格异常中划分出有意义的异常，即“剩余”异常。异常划分的方法有许多种，但一般可分为两类：(1) 纯数学方法；(2) “目视”地质剖面法。纯数学的方法包括圆环法求剩余，带通滤波器，向上或向下延拓以及导数法。纯数学的方法实质上是选择一个特殊的剩余“算子”（例如二次导数），然后在计算机上进行算子的运算。“目视”地质剖面法包括剖面分析以及其他的需要施加定性和定量地质约束的方法。

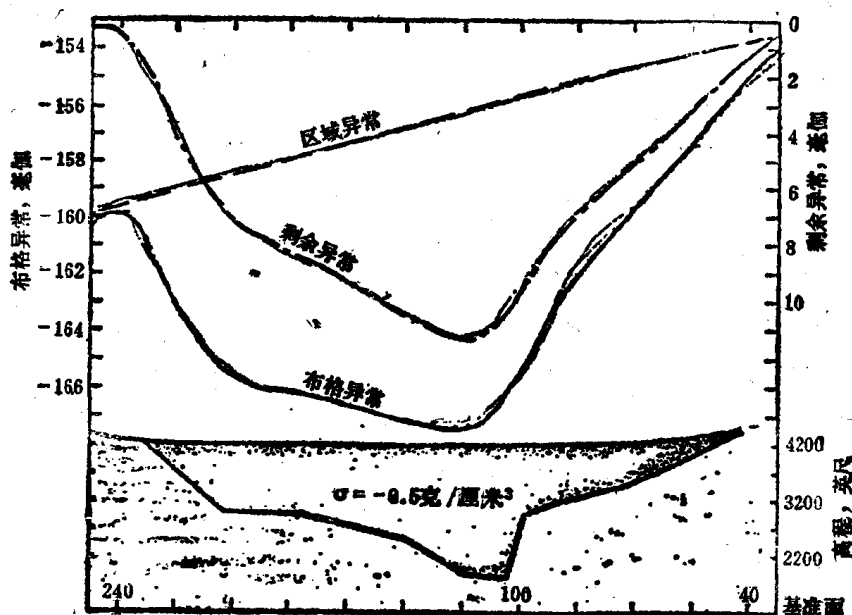


图 1.8 消除区域场实例

(引自吉蒙勒特，1967)

图1.8介绍了一个用“目视”分析法消除区域异常的例子（引自内华达州沃尔姆斯普林河谷的资料）。从图中看出，把与河谷充填物无关的重力效应设计为区域异常，并设法消除它。剩余重力异常是区域异常和布格异常间的差值。在这种情况下，可以认为是河谷充填物引起了剩余异常。

(3) 剩余重力异常的分析

得到有意义的剩余重力异常后，就需要确定引起它的物体的几何参数和密度。这项工作和异常的划分本身，都要求深入了解工区的地质情况。剩余重力异常的各种解释方法可以概括如下：

① 定性分析——重力高、重力低以及重力趋势变化的直观和轮廓分析（图1.9）。

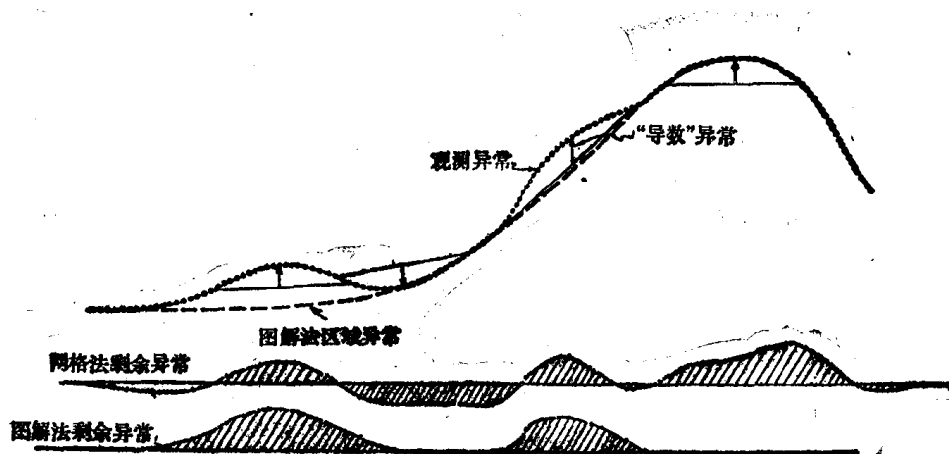


图 1.9 剩余异常
(引自内特斯顿, 1954)

② 深度估算

应用简单的模型计算和“经验法则”估算引起剩余重力异常的地质体的深度、密度及其大小（图1.10）。

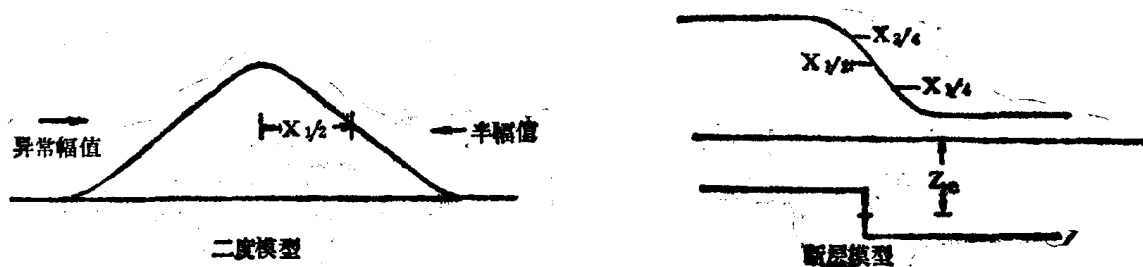


图 1.10 重力简单深度估算，“经验法则”

a. 对于从图中看起来拉长的物体，用水平圆柱体表示。到水平圆柱体中心的最大深度值为

$$Z_0 \cong X_{1/2}$$

这个模型能用来表示背斜或地垒这样的二度体。哈恩 (Haun) 和莱罗伊 (Leroy) 在《石油勘探地下地质学》(英文版, 1958) 中详细介绍了薄板深度估算方法。

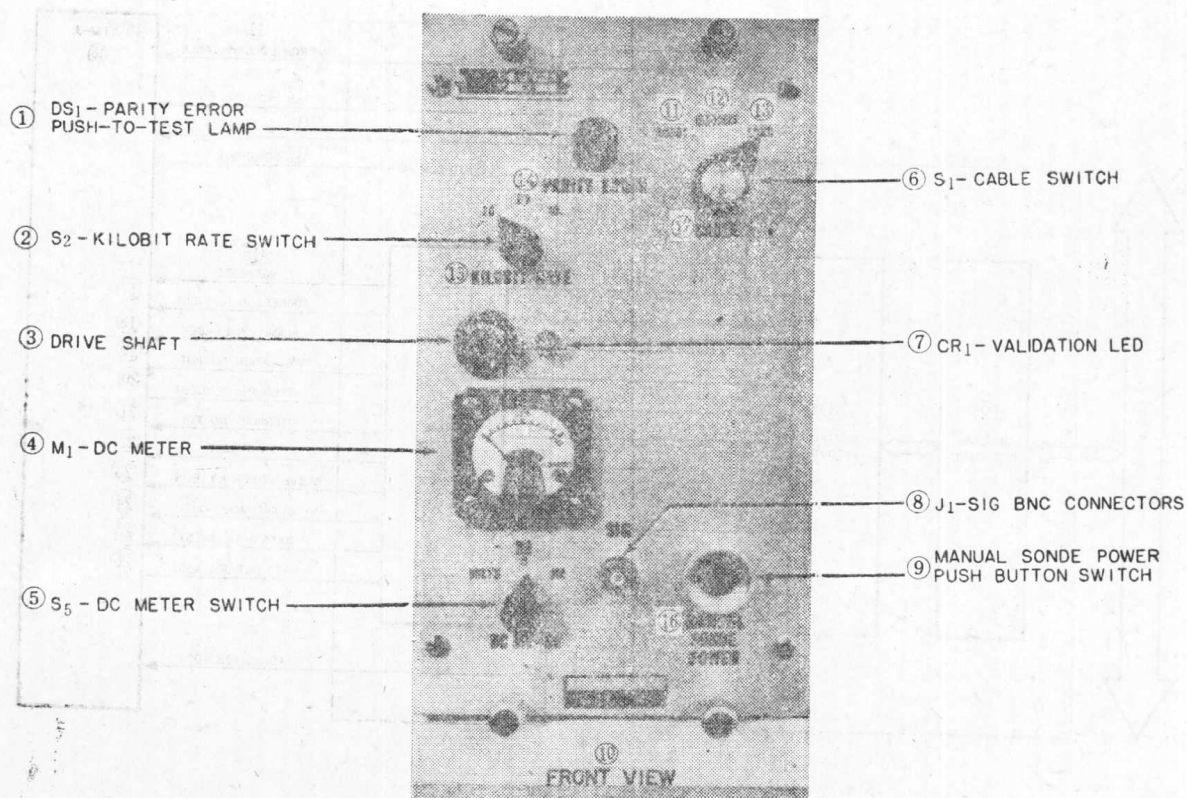


图2—4 ATM

①DS₁—奇偶误差检测灯；②S₂—千位传输率选择；③驱动轴；④M₁—直流电表；⑤S₅—直流电表开关；⑥S₁—电缆开关；⑦CR₁—正确状态发光二极管；⑧J₁—信号接头；⑨手动井下仪器电源开关；⑩正视图；⑪短；⑫中；⑬长；⑭奇偶校验误差；⑮千位比值；⑯手头探头电源；⑰电缆

3) 当声波信号与遥测信号共用同一缆芯时，为声波信号提供了选通门。

4) 识别CPU—BAA的合法请求，并回答。

5) 将井下仪器串传送上来的遥测信号进行放大，译码及多路解调。在每个遥测帧的后面，ATM—A产生一个中断请求，表示有数据要传送给中央处理机。ATM—A接到正确的地址和一个SWO（从属字输出）后，通过16线总线将每个数字传送给中央处理机。

6) 将6位下传遥测命令传送给井下仪器串。当接到正确的地址、一个SLBI（从属低字节输入）和一个TM（遥测）选通信号后，ATM—A接收来自CPU的数据并传输命令信号。

模块的电子线路的供电由SPU—CBA提供。

三、ATC（辅助遥测电路）

ATC是双向“B”遥测系统的井下部分，设有20千赫兹晶体振荡器通过遥测驱动器、控制器为它和仪器串中所有仪器组合数据的多路调制提供时基，以此来形成传输的遥测帧。每个帧都代表一组测量值。

ATC不仅测量和处理自身传感器的自然伽马、井温和电缆头电压等数据，而且还处理外部的套管接箍定位器和井径仪数据（所有数据都转换为数字形式并整理为“B”方式的串行传输）。

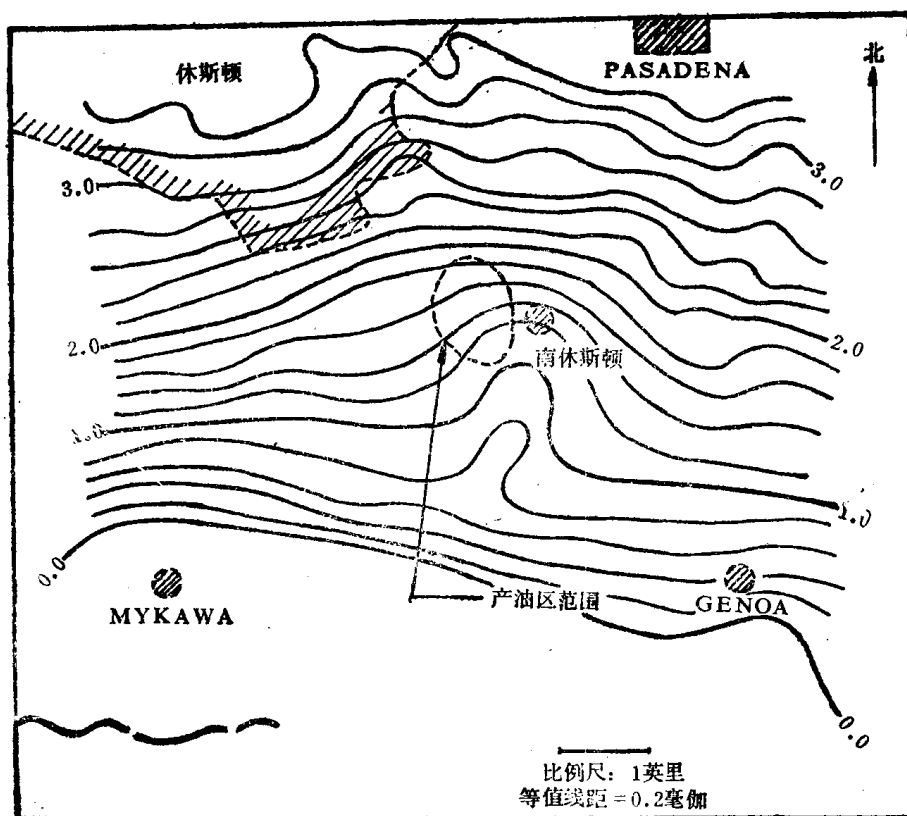


图 1.12 南休斯敦油田（得克萨斯州哈里斯县）布洛重力异常图

（引自内特尔顿，1976）

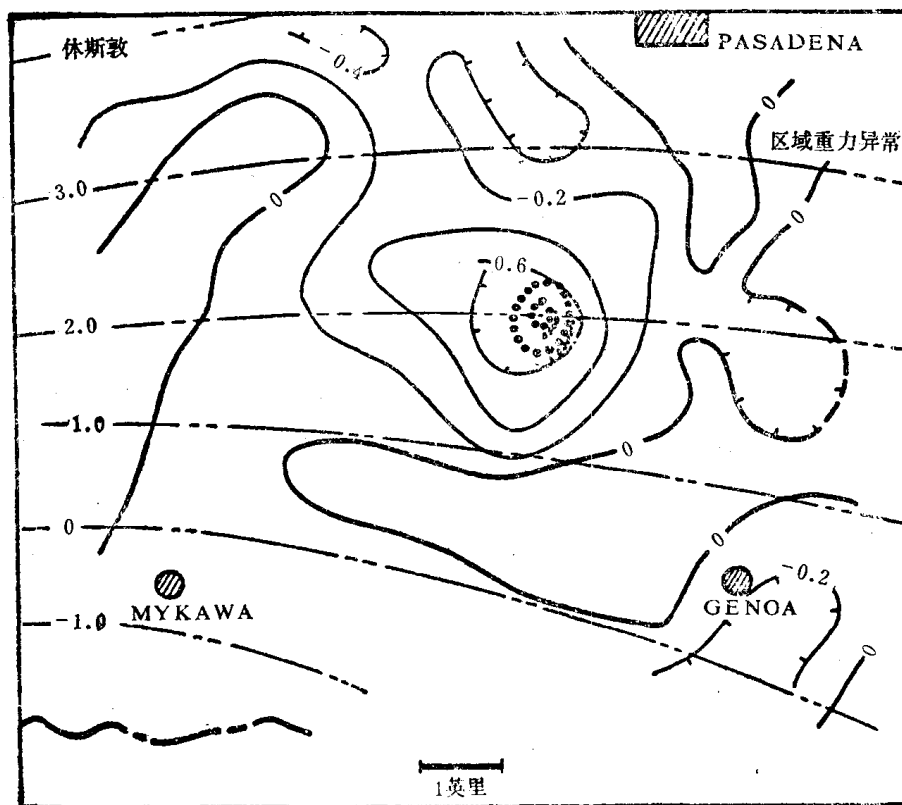


图 1.13 南休斯敦油田（得克萨斯州哈里斯县）图解法剩余异常图

（引自内特尔顿，1976）

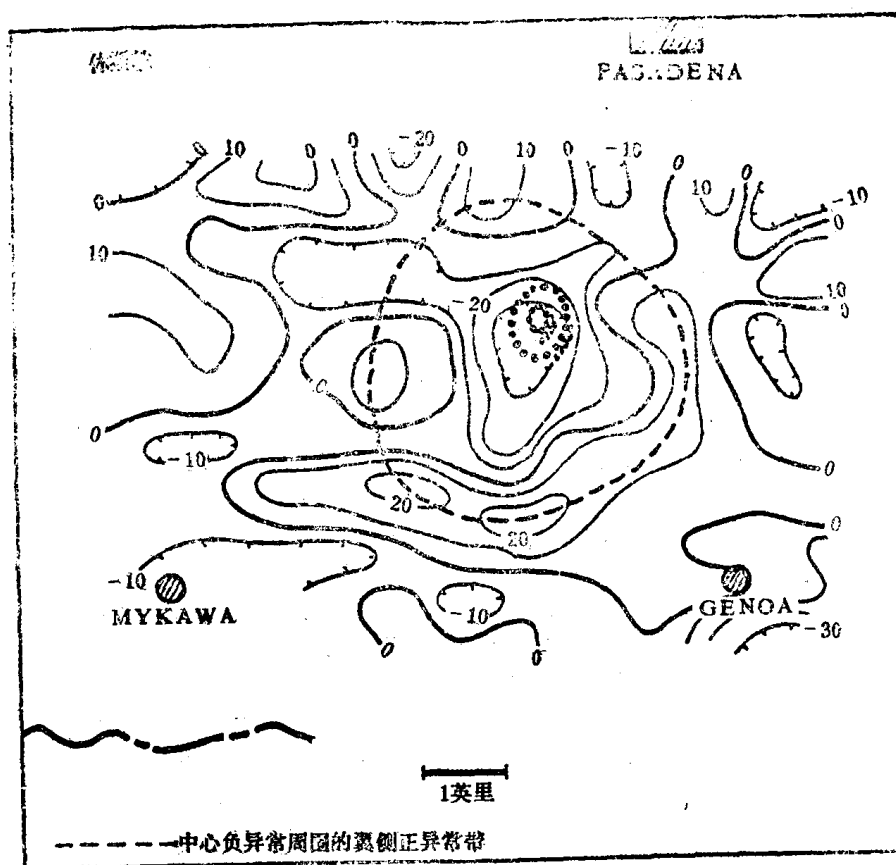


图 1.14 南洛杉矶油田（得克萨斯州哈里斯县）垂向二次导数图

（引自内特尔顿，1976）

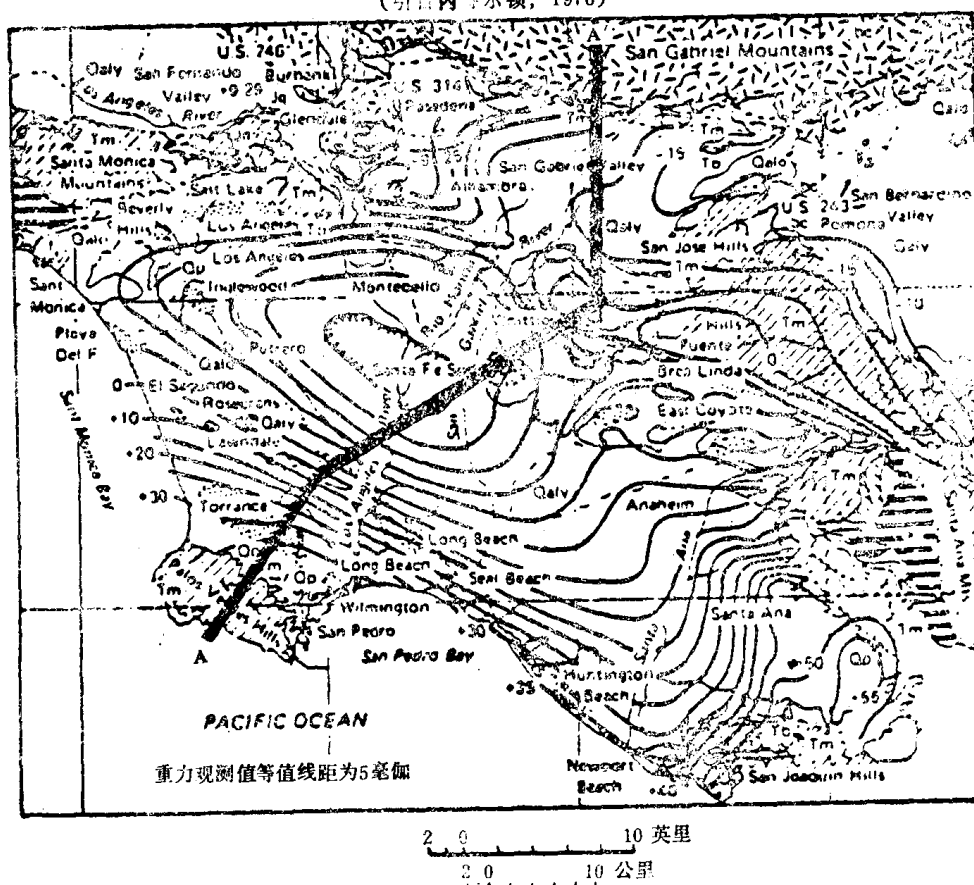


图 1.15 洛杉矶盆地布格重力异常图

（引自内特尔顿，1976）