

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

井中重力测量的解释与应用

L. A. 拜尔 编著

石油工业出版社

京)

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

井中重力测量的解释与应用

L.A.拜尔 编著

吕学谦 译 曾华霖 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共分三大部分。一、基础理论；二、19个应用实例；三、8篇论文。该书深入浅出，避免了冗长的数学公式，以简练的语言讲清了基本概念，以典型实例阐述了应用及效果。

这套丛书共分十册，可作为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。

责任编辑：孔秀兰 封面设计：胡 炯

Larry A. Beyer
**THE INTERPRETATION AND APPLICATIONS OF
BOREHOLE GRAVITY SURVEYS**

SEG 1981

美国勘探地球物理学家协会进修丛书
井中重力测量的解释与应用

L. A. 拜尔 编著

吕学谦 译 曾华霖 校

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京昊海印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行



787×1092毫米 16开本 16¹/₄印张 398千字 印1—1,700

1988年1月北京第1版 1988年1月北京第1次印刷

书号：15037·2613 定价：3.20元

ISBN 7-5021-0150-0/TE·148

科技新书目：159-218

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筛选出版。

目 录

一、基础理论

1. 导言	1
2. 井中重力测量方法	9
3. 估计地层密度和孔隙度的方法	36
4. 沉积岩的密度和孔隙度	39
5. 井中重力测量结果的解释	49
6. 应用和未来的发展方向	71

二、实例与应用

7. 南佛罗里达井中重力仪测量	78
8. 阿巴拉契亚泥盆系页岩的井中重力仪测量	78
9. Yucca Flat B 试验井的井中重力仪重复测量	78
10. 根据地面和井中重力仪测量计算的平均海拔因子密度	78
11. 密执安深盆地的井中重力仪测量	78
12. 加利福尼亚 Kern 河油田的井中重力仪测量	78
13. 加利福尼亚 Santa Fe Springs 油田的井中重力仪测量	78
14. 加利福尼亚 Midway-Sunset 油田井中重力仪测量和地面重力研究与岩 芯密度	79
15. 得克萨斯 East Hastings 油田根据井中重力仪测量确定套管外面的气层	79
16. 得克萨斯州 Yoakum 和 Hockley 县的 Abo 油田的井中重力仪测量	79
17. 怀俄明州 Dry Piney 组的通过逆掩断层的井中重力仪测量	79
18. 怀俄明州 Big Horn 盆地, Tensleep、Madison 和 Frontier 的井中重 力仪测量	79
19. 加利福尼亚州 Fillmore 油田 Spalding 储油层的密度模型	79
20. 盐丘翼部的井中重力仪测量	79
21. 假想礁块的密度模型	79
22. 密执安礁的井中重力仪测量	80
23. 加利福尼亚州 Midway-Sunset 油田第 35 号背斜的井中重力仪测量 和 岩芯研究	80
24. 加利福尼亚州 Midway-Sunset 油田 Santiago 区, 极陡倾斜剖面的井 中重力仪测量和密度模型	80
25. 南得克萨斯海上 South Padre 岛东部 COST-1 号井的井中重力仪测	

量.....	80
三、有关论文	
26. 精确的井中重力测量在石油勘探与开发中的前途	145
27. 井中重力仪在北密执安的成功应用	157
28. 用井中重力测量进行构造解释	167
29. 利用井中重力资料改进油气藏评价	180
30. 根据科罗拉多州 Watkins 附近 Denver 地层内浅褐煤层的井中重力资 料测定密度	195
31. 得克萨斯州 Culberson 县天然硫矿中井中重力测量的解释	211
32. 井中重力仪的工业应用和解释	222
33. 井中重力资料的应用问题	233
附录 缩写、符号和定义	255

一、基础理论

1. 导 言

(1) 绪言

本教程旨在就井中重力测井及其如何能用于提高地层一储集层的评价质量和地下勘探能力提供初步的、最新的描述。

井中重力测量结果主要反映测量所穿越岩石的垂向密度变化，其次反映可能存在于观测井周围的可探测到的横向岩石密度变化（异常密度结构）。井中重力测量所研究的井眼周围岩石的范围比常规测井方法大得多。

在多数情况下，因为井眼周围的地层是水平的或是近于水平，而且其横向密度是比较均匀的，于是可以假设地壳是一个密度均匀的水平层。在这样的区域，井中重力资料易于换算成高度准确和唯一的（重力）层密度剖面，解释工作主要包括垂向密度剖面在地层评价、油藏工程、测井与岩芯分析评价、地面重力与地震研究、或工程与岩石特性研究等方面的应用。

穿过井眼或在井眼可探测的范围内，存在诸如褶皱地层、断层、不整合、侵入体，或者岩性、孔隙度或孔隙流体的横向变化（用于选择性沉积或沉积后作用）的层段，横向密度变化可能是显著的。因为等密度面通常不怎么清楚，而且其形状或许相当复杂，因此分析这些情况下的井中重力资料更为困难。如果利用测井或岩芯分析手段可以得到独立的、可靠的垂向岩石密度资料，那么区分由垂向和横向的密度变化引起的井中重力效应是可能的。解释远距离的横向密度变化引起的井中重力效应受到那些可以用来推断井的构造与地层背景的其他地质与地球物理资料的严重影响。解释不是唯一的，通常也必定是简单的。

井中重力测量的成功应用往往需要了解常规裸眼井测井方法的优缺点，以及控制沉积岩密度和孔隙度不均匀的因素。为了从观测中获取更多的资料，区域地质家或钻井地质学家、地球物理学家、测井分析家、以及油藏工程师或岩石物理学家的共同努力是必不可少的。

井中重力的应用是多方面的。要使人们广泛承认和大量应用这一方法可能取决于仪器进一步的改进。

(2) 重力勘探

重力勘探是以牛顿的万有引力定律，即

$$力 = k \frac{M_1 M_2}{R^2} \quad (1-1)$$

为基础的。该定律指出：任何两个块状物体之间存在一种力，该力与它们的质量乘积成正比，而与它们之间的距离平方成反比。于是，较大的质量其引力就比较大，并随它们之间距离的增大而迅速减小。比例常数（k）是牛顿万有引力常数，用卡尔迪什秤作普通的物理实验即可测得该常数值。

最新的和更为可靠的牛顿万有引力常数值已由 Luther 和 Towler(1981)给出：

$$k=6.6726\pm0.0005\times10^{-11}\text{米}^3/\text{秒}^2\cdot\text{公斤}$$

与通常所公认的

$$6.6720\pm0.0041\times10^{-11}\text{米}^3/\text{秒}^2\cdot\text{公斤}$$

的数值相比,数值上有微小的变化,精度上却有很大的提高。关于确定 k 值的历史梗概和卡尔迪什秤的描述可参阅内特利顿的著作 (Nettleton, 1976, 10-13 页)。

如果 M_1 代表地球的质量, M_2 是灵敏元件的质量,则作用在重力仪灵敏元件上的力由方程(1-1)给定。根据牛顿第二运动定律,作用在灵敏元件 M_2 上的力也可以表达为

$$\text{力}=M_2\cdot a \quad (1-2)$$

式中, a 是 M_2 在引力作用下取得的加速度。将方程 (1-1) 和 (1-2) 合并即可得到重力表达式:

$$g = \frac{\text{力}}{M_2} = k \frac{M_1}{R^2} \quad (1-3)$$

重力可以用单位质量的力或加速度为单位表示。地球物理学家将加速度单位取名为“伽”

$$1 \text{ 伽} = 1 \text{ 厘米}/\text{秒}^2 \approx 10^{-8} \text{ “重力全值”}$$

本文所使用的单位是重力勘探通常使用的专用测量单位,即毫伽(mgal);

$$1 \text{ 毫伽} = 10^{-8} \text{ 厘米}/\text{秒}^2 \approx 10^{-6} \text{ “重力全值”}$$

地面重力详测有时用“重力单位”(gu)

$$1 \text{ 重力单位} = 0.1 \text{ 毫伽} = 10^{-4} \text{ 厘米}/\text{秒}^2 \approx 10^{-7} \text{ “重力全值”}$$

在井中、潮汐带或高精度地面重力测量中偶而也使用微伽(μgals)作单位;

$$1 \text{ 微伽} = 10^{-8} \text{ 毫伽} = 10^{-6} \text{ 厘米}/\text{秒}^2 \approx 10^{-9} \text{ “重力全值”}$$

目前使用的重力仪仅仅对重力加速度的垂向分量是敏感的。因此,对于一个与重力仪相距 r_i , r_i 与重力仪垂线的交角为 ϕ_i 的质量 m_i 来说,重力仪灵敏元件感受的加速度为

$$g = k \frac{m_i}{r_i^2} \cos\phi_i \quad (1-4)$$

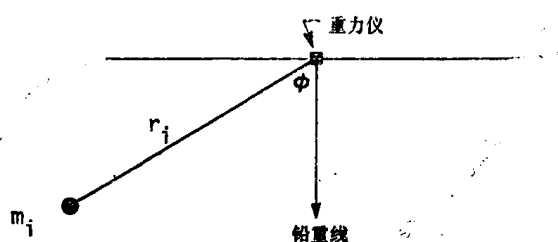


图 1-1 点质量的重力引力

如果重力仪移到另一位置上,距离 r_i 和角度 ϕ_i 可能都要变化,所以质量 m_i 所引起的加速度是不相同的。

地球的重力勘探通常要涉及岩石的空间分布问题,而这些岩石的质量是个未知数,但是可以部分地知道或可以推断它们的密度和体积。我们知道

$$\text{质量} = (\text{密度}) (\text{体积})$$

于是,方程 (1-4) 就可以写为

$$g = k \frac{\rho_i V_i}{r_i^2} \cos\phi_i \quad (1-5)$$

式中 ρ_i 和 v_i 系质点密度和体积元。

在实际的质量空间分布情况下，密度一体积元可以通过积分求和。方程 (1-5) 变为

$$g = k \int_v \frac{\rho}{r^2} \cos\phi dv \quad (1-6)$$

其中 dv 为体积元， $\int_v$ 表示在体积 v 的范围内体积元的总和。例如，重力仪灵敏质量感受到的一个位于距离为 r 、半径为 R 、密度为常数 ρ 的球形质量所引起的重力加速度 (图 1-2) 为

$$g = k \rho \frac{4\pi R^3}{3} \frac{1}{r^2} \cos\phi \quad (1-7)$$

而球体的质量为

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho R^3 \quad (1-8)$$

所以，

$$g = \frac{km}{r^2} \cos\phi \quad (1-9)$$

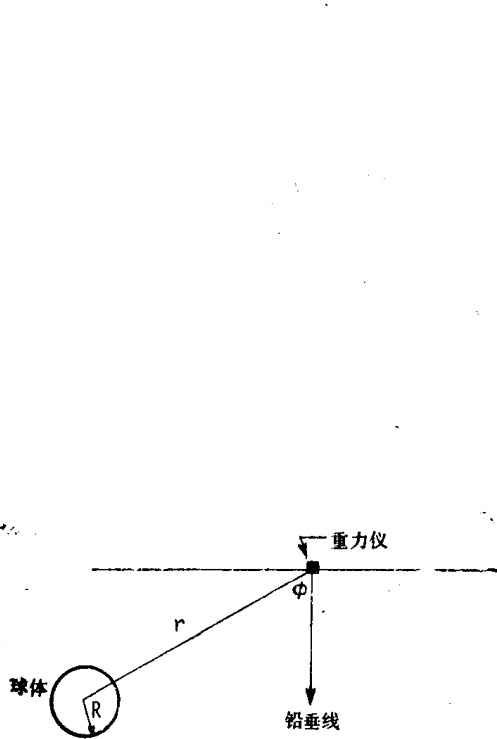


图 1-2 一个位于距重力仪为 r 处的、半径为 R 、密度为 ρ 的球体的引力图示

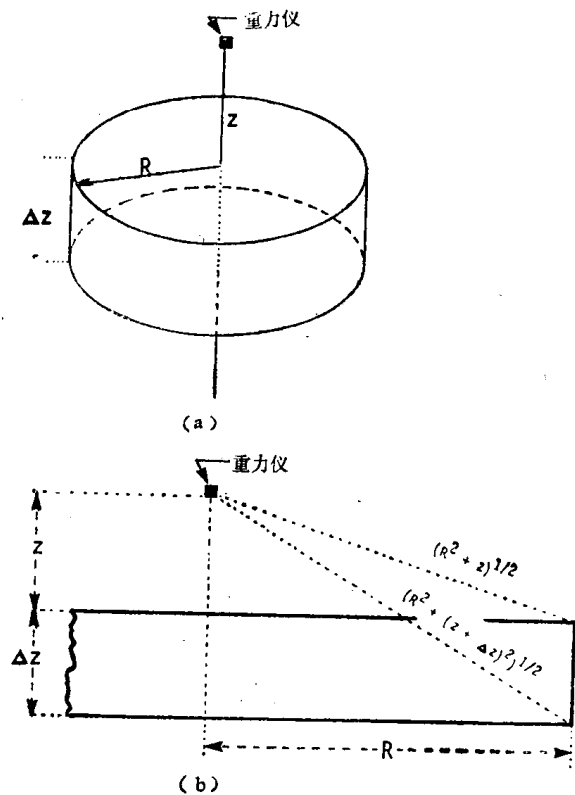


图1-3 (a)沿半径为 R 、厚度为 Δz 的直圆柱体的垂直轴上高度为 z 处的引力；(b)表示方程(1-10)中各项的部分直圆柱体剖面图

于是，如果将球体的全部质量聚于球体的中心点，那么密度为常数的球体所引起的重力加速度将与这个质点产生的引力相等。

井中重力另一特别重要的有用例子是沿直圆柱体垂直轴安置的重力仪所感受的重力加速度（图 1-3a）。在这种情况下，重力加速度为（Nettleton, 1976, 199 页）

$$g=2\pi k\rho[\Delta z+(R^2+z)^{1/2}-(R^2+(z+\Delta z)^2)^{1/2}] \quad (1-10)$$

如果允许圆柱体的半径 R 变得很大，即可得到一个极为重要的井中重力的公式。当 R 增大时

$$(R^2+z^2)^{1/2}-[R^2+(z+\Delta z)^2]^{1/2}\rightarrow 0$$

因此，方程（1-10）变成

$$g=2\pi k \rho \Delta z \quad (1-11)$$

根据方程（1-11），由无限延伸水平平板引起的重力加速度仅由平板的密度 ρ 和厚度 Δz 所决定，而与测点在平板以上的距离无关。这个关系式的重要性以后会变得更加明显。

根据方程（1-6）所给定的密度一体积积分，计算由任一质量体引起的任一点的重力加速度是可能的，这一质量体可由它的密度和体积所限定。按照这一方法，可以设计密度模型来模拟采用的地质模型，并可计算这个模型引起的重力加速度，以便和测量的重力值加以比较。

对在地球表面测量的重力变化进行地球总平均重力场、地球旋转产生的离心加速度、重力测点之间的高差、以及不规则地形表面产生的影响等方面的校正，剩余的重力变化即为重力异常。由于地球内部，特别是地壳中的质量分布不仅是径向不对称，而且横向上也有变化，因此出现有用的重力异常。图 1-4 示出了洛杉矶盆地的重力异常图，该图表明在盆地的低密度沉积岩范围内存在一个明显的重力低。

为了了解重力异常图的地质意义，依据地下岩石的空间分布及其密度的地质资料建立密度模型。用上述的密度一体积积分法计算出这些模型的重力加速度或重力异常。由于可用于最初制作密度模型的资料甚少，所以根据它们计算的异常很难与在地球表面范围内勾绘的异常吻合。但是，对密度模型进行调整后，它们的相关异常与实际测绘的异常极为近似，因此能获得新的勘探资料。

实际的重力研究有两个重要方面必须给予关注。第一，重力异常是由密度差而不是绝对密度引起的。例如，由于盐丘比围岩的密度小，所以，在盐丘上方通常呈现重力低。图 1-5 说明了密度差的概念，图中，简单背斜褶皱使较为致密的岩层向上隆起与低密度围岩形成密度差。

第二个重要的实际问题是密度模型的非唯一性。理论上，可设计出无数个能引起同样重力异常的密度一体积的组合形式。因为这种“解释上的多解性”，地质控制和精度必然会对重力勘探中所作的全部解释起决定性作用。图 1-6 说明，不同的密度一体积组合形式怎样产生相同的重力异常。

除在此介绍的之外，重力勘探尚有许多方面的问题。如果需要更详细的了解，可考虑有关重力勘探方法许多极好的著作（例如 Nettleton, 1976; Grant 和 West, 1965; Telford 等人, 1976）。

(3)井中重力基本方程

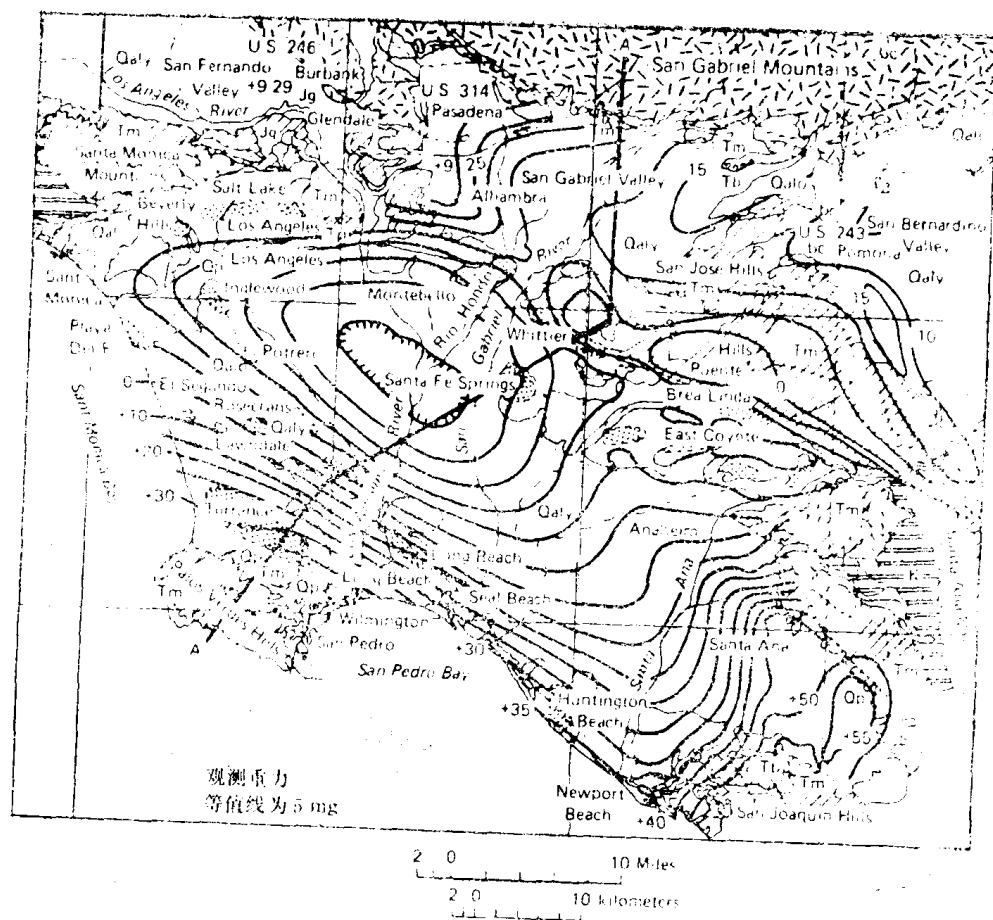


图 1-4 洛杉矶地面地质图和布格重力异常综合图
(Nettleton 根据美国地质调查所 190 号专业论文修改的, 1976)

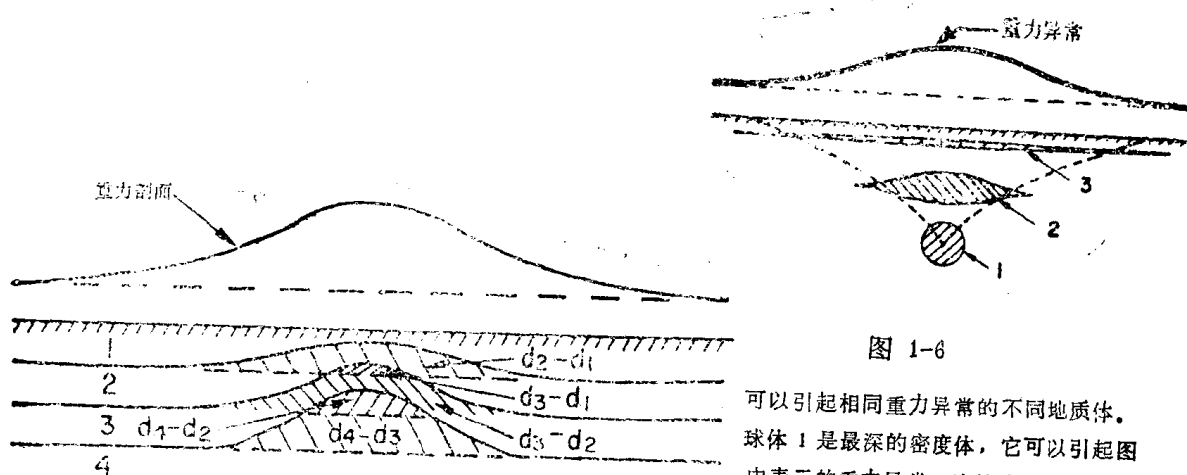


图 1-5 密度层、密度差和重力异常 (引自Nettleton, 1977)

图 1-6

可以引起相同重力异常的不同地质体。球体 1 是最深的密度体, 它可以引起图中表示的重力异常。比较浅的和较宽的地质体, 例如 2 和 3, 也可以引起该异常。每个地质体与围岩的密度差是不同的, 但是, 每个质量体总的剩余质量异常是相同的 (引自Nettleton, 1971)

把一简单地球密度模型中的重力分布列成公式即可导出井中重力的基本方程。如果假设地球是一个具有径向对称密度分布的非旋转的理想球体, 而且使其不受别的质量体重力场的影响, 于是, 在地球表面的自由空气中的重力和重力垂直梯度为

$$g = k \frac{M}{R^2} \quad (1-12)$$

$$\frac{\partial g}{\partial r} = -\frac{8}{3} \pi k \bar{\rho}_r \quad (1-13)$$

式中, M 、 R 、和 $\bar{\rho}_r$ 分别代表地球的质量、半径和平均密度。

在距离地球中心任一距离 r 处的一个内点上, 半径为 r 的内球体的质量是

$$m_r = 4\pi \int_0^r \rho(r) r^2 dr$$

式中的 $\rho(r)$ 是内部密度, 它是 r 的函数。用 m_r 和 r 分别置换方程 (1-12) 中的 M 和 R , 因为纯粹由 r 和 R 之间的球形壳在 r 处引起的引力为零 (Ramsey, 1940), 即可得到内点的重力

$$g = \frac{4\pi k}{r^2} \int_0^r \rho(r) r^2 dr \quad (\text{Benfield, 1937})$$

这个内点的垂直梯度为

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial r} &= \frac{4\pi k}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \int_0^r \rho(r) r^2 dr + \int_0^r \rho(r) r^2 dr \frac{\partial}{\partial r} \frac{4\pi k}{r^2} \\ \frac{\partial g}{\partial r} &= 4\pi k \rho - \frac{8}{3} \pi k \bar{\rho}_r \quad (\text{Miller 和 Innes, 1953}) \quad (1-14) \end{aligned}$$

式中, ρ 表示半径为 r 的无限薄的球形壳的密度, $\bar{\rho}_r$ 代表半径为 r 的内球体的平均密度。至于更详细的资料以及推导方程 (1-14) 的其它略有不同的方法可参阅 Gutenberg (1959)、Hammer (1963)、和 Beyer (1971) 等人的著作。

因为井中重力测量涉及测量有限的重力增量 (Δg) 和深度增量 (Δz), 所以需要以增量表示的方程取代微分表示法。显然为满足井中重力测量的需要, 可以用增量符号表示方程 (1-14)。但是, 直观推导以增量符号表示的井中重力基本方程是以球形壳外表面的重力 (g_1) 和内表面重力 (g_2) 为条件实现的 (图 1-7):

$$\begin{aligned} g_1 &= kM/R^2 \\ g_2 &= k(M - \Delta M)/(R - \Delta z)^2 \end{aligned} \quad (1-15)$$

已知, 在球形壳里面的点, 纯粹由球形壳引起的重力加速度等于零 (例如, 参阅 Ramsey 的论文, 1940)。这就意味着对一个密度分布径向对称的地球来说, 由球形壳引起的重力不含重力分量 g_2 。

壳的内外表面之间的重力差 (Δg) (图 1-7) 为:

$$\Delta g = k \left[\frac{M - \Delta M}{(R - \Delta z)^2} - \frac{M}{R^2} \right] \quad (1-16)$$

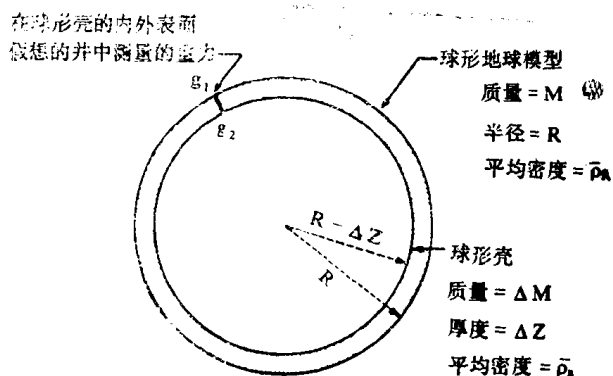


图 1-7 在球形壳内外表面假想的井中重力
测量原理图

方程 (1-16) 右边的分子除以 M 、

分子除以 R^2 ，并提出因子 $\frac{M}{R^2}$ ，于是得到

$$\Delta g = k \frac{M}{R^2} \left[\left(1 - \frac{\Delta M}{M}\right) \left(1 - \frac{\Delta z}{R}\right)^{-2} - 1 \right] \quad (1-17)$$

式中 $\left(1 - \frac{\Delta z}{R}\right)^{-2}$ 项可以展成级数

$$\left(1 - \frac{\Delta z}{R}\right)^{-2} = 1 + 2 \frac{\Delta z}{R} + 3 \left(\frac{\Delta z}{R}\right)^2 + \dots \quad (1-18)$$

并且，

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{\bar{\rho}_s}{\bar{\rho}_R} \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta z}{R}\right)^3 \right] \quad (1-19)$$

其中 $\left(1 - \frac{\Delta z}{R}\right)^3$ 可以展为级数

$$\left(1 - \frac{\Delta z}{R}\right)^3 = 1 - 3 \frac{\Delta z}{R} + 3 \left(\frac{\Delta z}{R}\right)^2 - \dots \quad (1-20)$$

因为 $R \gg \Delta z$ ，所以这些级数 (方程 1-18 和 1-20) 中的二次项和二次以上的项可以忽略。当将其忽略时，方程 (1-17) 变为

$$\Delta g = \frac{kM}{R^2} \left[2 - 3 \frac{\bar{\rho}_s}{\bar{\rho}_R} \right] \left[\frac{\Delta z}{R} \right] \quad (1-21)$$

或者，将 $M = \frac{4}{3} \pi R^3 \bar{\rho}_R$ 代入方程 (1-21)，则

$$\frac{\Delta g}{\Delta z} = \frac{8}{3} \pi k \bar{\rho}_R - 4 \pi k \bar{\rho}_s \quad \text{Airy (1856)} \quad (1-22)$$

根据方程 (1-13)，方程式 (1-22) 中的第一项是在非旋转球状地球上的自由空气中的重力垂直梯度。用正常自由空气垂直梯度 $\frac{\partial g}{\partial h}$ 置换该项，就考虑到了地球的旋转和普通的椭

球形状。Heiskanen 和 Moritz (1967, 78-79 页) 给出了 $\frac{\partial g}{\partial h}$ 的方程式，用 1967 年大

地测量参考系统的常数, 该式变为

$$\frac{\partial r}{\partial h} = 0.094112 - 0.000134 \sin^2 \phi - 0.134 \times 10^{-7} h$$

式中, ϕ 是纬度; h 是海拔高度, 以英尺为单位。从赤道到任一极, 正常自由空气垂向梯度变化小于 0.2%, 随高度的变化每 1000 英尺 (1 英尺 = 30.48 厘米, 下同) 约为 0.01% 或每 1000 米为 0.05% 左右 (例如, 参见 Hammer 的论文, 1970)。对井中重力测量来

说, 这些变化是可以忽略的, 在地面重力研究中, $\frac{\partial r}{\partial h} \approx F = 0.09406$ 毫伽/英尺 (图 1-8)。

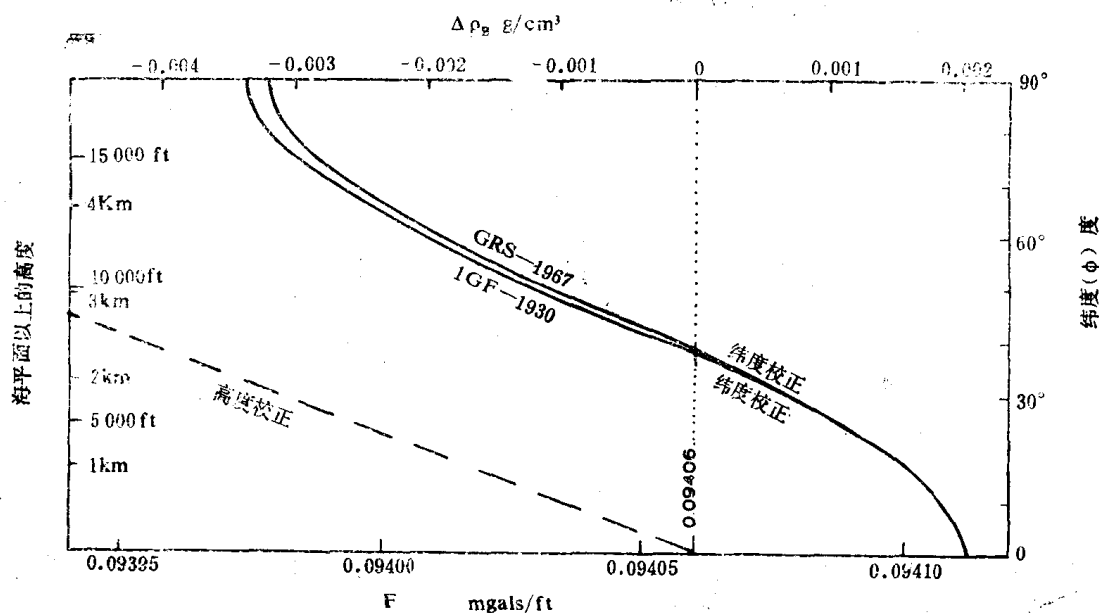


图 1-8 正常自由空气垂向梯度 $\frac{\partial r}{\partial h}$ 随纬度和海拔高度的变化。随纬度的变化是相对 1930 年国际椭球体和 1967 年天地测量参考系统表示的 (引自 Robbins, 1981)

用 F 代替方程式 (1-22) 的第一项, 就可获得当地球具有径向对称密度分布的情况下, 在垂直井中测量的间隔垂向梯度 $\Delta g / \Delta z$ 与横向围岩的间隔密度 $\bar{\rho}$ 之间的基本关系式

$$\frac{\Delta g}{\Delta z} = F - 4\pi k \bar{\rho} \quad (1-23)$$

因为忽略方程 (1-18) 和 (1-20) 中二次和高次项, $-4\pi k \bar{\rho}$ 项即适用于厚度为 Δz 的无限延伸的水平层, 而不适用于厚度为 Δz 的球形壳, 所以去掉了 $\bar{\rho}$ 的下标 S 。在 2.1 节中, 介绍了方程 (1-23) 的另一种推导方法。

(4) 研究史简介

地下重力研究大致始于 1826 年、1828 年和 1854 年期间 Airy (1856) 进行的摆仪测量, 他试图 (根据方程 1-22) 通过测量采矿竖井顶底之间的间隔垂向梯度的办法来测

定地球的平均密度,为了测定地球的平均密度,Airy 根据实验室测定从竖井井壁采集的标本的体密度估计测站之间岩石剖面的密度,并在考虑到不规则地表的影响之后,对摆仪测量结果作测站之间岩石剖面的重力效应校正。1883 和 1885 年,Von Sterneck 作了目的类似、方法稍有区别、结果得到改进了的试验,他把摆悬挂在竖井中两个以上深度不同的测点上记录了重力随深度明显的非线性变化,认为这些变化部分由于未校正温度对摆的影响,还可能是由于存在地下密度的变化 Poynting (1894, 29-39 页)。Rische (1957, 第 12 页)列表说明 1871 到 1902 年期间的其它地下摆测工作。

由于摆仪及测量的方法精度较低;根据岩样密度测定精确估计局部岩石密度分布方面的困难(因此,嵌入岩层、地形和采矿作业方面的引力影响不定);以及(由于缺少重力场资料)无法考虑潜在的异常垂直梯度,因此妨碍根据这些值得注意的早期试验精确地测定地球的平均密度。Poynting (1894, 第 39 页)明智地提出反演问题:用单独的方法确定地球平均密度(或正常自由空气垂向梯度),然后利用在垂直竖井中的重力测量来计算围岩的密度。

Stokes(Airy, 1856, 第 354 页)以及后来的 Helmert (1884, 第 96 页)给出的正常自由空气垂直梯度方程,其中包含地球的角速度和椭率的一次项。直到廿世纪初期,Helmert (1910)知道了足够精确的椭率和赤道半径,并用于计算正常自由空气垂直梯度的平均值,在以后精心改进参考椭球体时,此值基本保持不变。Poynting 建议的第二个先决条件——一种在竖井中较为容易和精度高的测定重力差的方法——是用三十年代期间研制的轻便重力仪实现的。

在采矿竖井中进行的重力仪测量主要用于① 确定围岩的密度(Jung, 1939; Hammer, 1950; Bodemuller, 1954; Domzalski, 1954; Whetton 等人, 1957; Mclean, 1961; Lukanchenko, 1962; Secor 等人, 1962; Bhattacharji, 1963; McCulloh, 1965; Healy, 1970), ⑤ 确定地球平均密度(Miller 和 Innes, 1953); Domzalski 1955b), ③ 研究矿体造成的大的正密度差所引起的异常垂向梯度(Rogers, 1952; Domzalski, 1955a)。McCulloh (1965)对上述大部分工作作了讨论。其它研究工作包括地下重力仪测量(例如,参阅 Oelsner, 1960; Plouff, 1961; Kazinskii, 1963; Summer 和 Schnepfe, 1966; Drake, 1957)和扭秤测量(例如参阅 Rische, 1957, 70-81 页)。高精度井中重力测量(± 0.02 毫伽或精度更高)的研究及其初期应用始于六十年代,将在 2-(4) 节中予以讨论。

2. 井中重力测量方法

(1) 基本井中测量

井中重力测量是通过在一系列的井中测点停放井中重力仪(BHGM)及读数进行的,这些井下测点是根据测井图的研究预先选定的,以满足测量目的的需要。该方法测出了一系列重力差(Δg)和深度差(Δz),这些测量结果组成了连续测点之间的间隔垂直重力梯度($\Delta g/\Delta z$)(图 2-1)。

写成重力差,井中重力基本方程(方程式 1-23)变为

$$\Delta g = F \Delta z - 4\pi k \rho \Delta z \quad (2-1)$$

根据方程(2-1), 重力值向下增大, 其增大速率由自由空气垂直梯度(F) (基本上是一常数) 和符号相反的梯度($4\pi k \bar{\rho}$) (随围岩密度变化而变化) 之差所确定。正的 $F\Delta z$ 项是指向地球质量中心引起的向下增大的重力值。负的 $4\pi k \bar{\rho} \Delta z$ 项是厚度为 Δz 的无限延伸水平层引力的两倍, 图 2-2 对此作了说明。

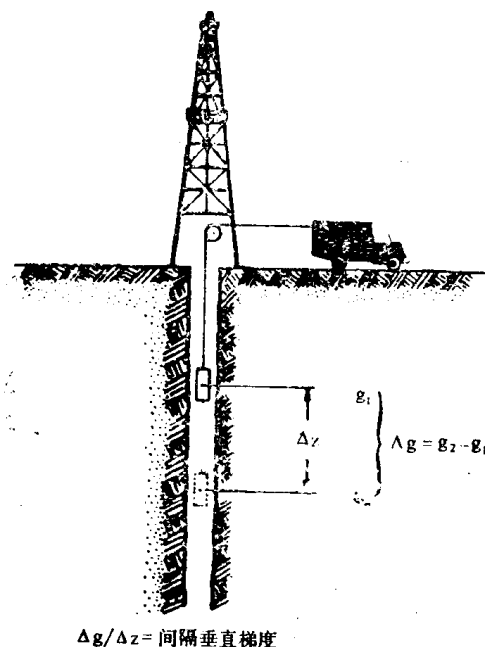


图 2-1 测量间隔垂直重力梯度的原理图
规定间隔垂直重力梯度以毫伽/英尺 (mgals/ft)
或者其它简便的加速度/长度为单位

方程(2-1)中, 重力差(Δg)随着水平层密度($\bar{\rho}$)的增大而减小, 反之亦然。或者返回到基本方程

$$\Delta g / \Delta z = F - 4\pi k \bar{\rho} \quad (2-2)$$

层密度的增大与间隔垂直梯度的减小相对应, 反之亦然。就实用而言, 测得的间隔梯度($\Delta g / \Delta z$)和水平层密度($\bar{\rho}$)之间的这种简单关系在大多数地质情况中都是有效的。因此, 除去基本重力和深度测量结果的简单换算以外, 常常无需分析就能精确地确定不同 Δz 间隔内岩石密度的微小变化。

(2) 影响井中重力测量结果的质量扰动

井中重力基本方程用于实际地球时并不精确。地球表面的起伏和地下密度层的倾斜都会使井中重力沿井孔向下发生变化。

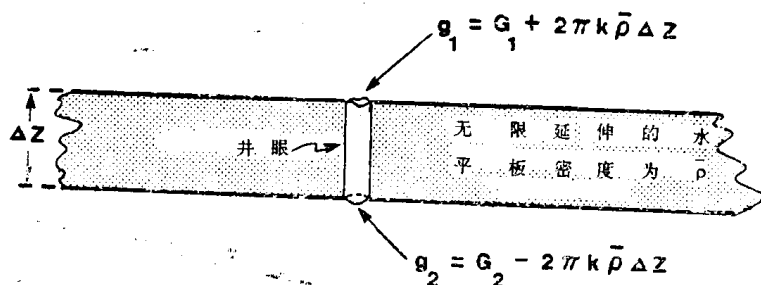


图 2-2 无限延伸水平板的横剖面图

它说明了在方程(2-1)中怎样出现 $-4\pi k \bar{\rho} \Delta z$ 项 (原文误为 $-4\pi k \pi \Delta z$ —译注)。 G_1 和 G_2 表示重力仪在平板顶面和底面感受到的除平板本身引起的重力加速度之外所有其它的重力加速度。重力仪置于平板底部时, 平板引起的加速度的指向向上, 所以它为负号

由地形起伏、海洋测深技术或与井有关的质量扰动引起的多余或附加的加速度是微小的, 将井下重力测点移动几英尺即可避免, 或者易于对其进行足够精确的计算和校正。通常

这类扰动质量很小，它们产生的加速度与井周围的地下岩石质量所产生的加速度相比可忽略不计。这是井中重力测井超过常规密度和孔隙度测井方法的优点之一：测量结果基本不受套管、井眼周围生产层损害、以及与井眼有关的其它因素的影响。外界对井中重力测量的影响将在 2-(5) 节作更详细的讨论。

在井中检测到的重力变化可能是由地下密度层倾斜引起的（横向密度变化）。某些情况下，根据井中重力资料确定的“异常”或“构造”影响可能有益于勘探。在后边的章节中将会更多地介绍异常的影响。

(3) 实用公式

井中重力基本方程可以修改成包括实际地球密度扰动的形式：

$$\Delta g / \Delta z = F - 4\pi k \bar{\rho} + \Delta G_s + \Delta G_t + \Delta G_b \quad (2-3)$$

(McCulloh, 1966b)

$\Delta g / \Delta z$ 是测得的间隔垂直梯度； F 是正常自由空气垂直梯度，其值为 0.09406 毫伽/英尺； $4\pi k \bar{\rho}$ 是由间隔密度为 $\bar{\rho}$ 、在横向上相邻的无限延伸水平层所产生的间隔垂直梯度； ΔG_b 是由质量扰动引起、观测到的间隔垂直梯度的小数部分，这些质量扰动可能是井径变化、套管外侧的水泥柱、套管尺寸或重量的变化、套管鞋、或井中流体柱等所引起的； ΔG_t 是相对于基准面的地表地形或海洋测深引起的观测间隔垂直梯度的小数部分，通常以井孔顶面的高程作为基准面； ΔG_s 是由局部和区域横向密度变化引起的观测间隔垂直梯度的小数部分（称为异常垂直梯度）。

通常要确定地形和井眼影响的校正值，并用作单个的重力测量结果的校正值。当 Δg 值考虑了这些校正时，方程 (2-3) 变为

$$\Delta g / \Delta z = F - 4\pi k \bar{\rho} + \Delta G_s \quad (2-4)$$

求间隔密度 $\bar{\rho}$ ，并代入 F 、 π 和 k 的常数值，得

$$\bar{\rho} = 3.680 + 39.127 (\Delta G_s - \Delta g / \Delta z) \quad (2-5)$$

(单位为英尺、毫伽、克/厘米³)

$$\bar{\rho} = 3.680 + 11.926 (\Delta G_s - \Delta g / \Delta z) \quad (2-5a)$$

(单位为米、毫伽、克/厘米³)

令 $\Delta G_s = 0$ ，可计算出间隔密度 $\bar{\rho}$ 。只有把单独的密度资料（即伽马-伽马密度测井）与 $\bar{\rho}$ 值相比较，才能知道是否存在可检测的“异常或构造”的影响（ ΔG_s ）。如前所述， ΔG_s 常常可以忽略不计，或者略有变化，因此，即使忽略 ΔG_s ，间隔密度的相对值依然精确。

重力梯度通常以每英尺或每米毫伽或微伽为单位表示。有时使用厄缶单位 (E.U.)。表 2.0 汇编了重力常数 k 的最新数值，并概括了井中重力测量使用的一些常数和换算系数。

(4) 井中重力仪

①工作原理和发展史 重力仪是非常灵敏的天平，它测量重力加速度变化时灵敏质量的重量（力）变化：即

$$\Delta W = m \Delta g$$