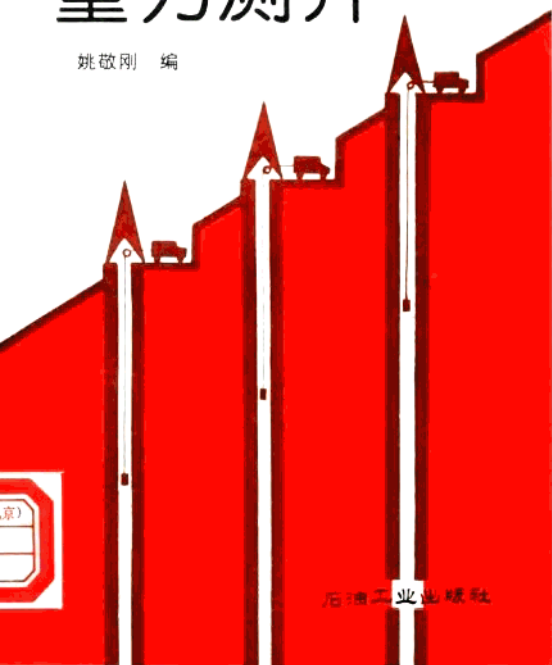


重力测井

姚敬刚 编



登录号	- 087405
分类号	P631.1
种次号	006

重力测井

57/27/16

姚敬刚 编



200401225

石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

重力测井是把地面重力勘探转到井下测量的一种测井方法。它的特点是：探测半径大、不受泥饼、套管、水泥环、滤液和井壁塌陷等影响，因而对于寻找裂缝溶洞型油气藏具有明显的优越性。本书从重力测井的基本原理，测井仪器和操作方法，以及资料分析等方面系统地介绍了这一技术。

本书可供测井和物探技术人员及各大专院校地学科的广大师生参考。

* * *

全书由邱玉春同志统审。

重 力 测 井

姚敬刚 编

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 32开本 6³/₄印张 143千字 印1—800

1994年8月北京第1版 1994年8月北京第1次印刷

ISBN7-5021-1043-7/TE·971

定价：6.00元

前 言

重力测井是重力测量的一种特殊形式，它是在重力勘探不断发展过程中派生的一个分支。从陆地到海洋，从地表面上升到空中，以至深入地下，重力测量经历了一个漫长的历程。作为以地球为研究对象的地球物理学科（Physics of the Eearth, Физика Земли）分支之一的重力学，由地球表面横向分布测点，与地壳地层平行地作业，转到垂直地穿过地层进行测试。这个重力的第三维量的测量成果不但具有实用工业价值，而且对大地物理学和大地测量学等具有深远的学术价值。

一、重力测井的发展过程

早在19世纪的中叶，就有科学家在地下矿山的竖井或坑道中用振摆仪进行过地下重力值测量的研究和探索，其目的是为了研究地球质量、地球平均密度等。

到本世纪30至40年代，地面重力测量在大地测量和石油天然气及其它矿藏的勘探中有了长足的进步，并取得了丰硕成果。在这同时，有人意识到应使重力仪更接近矿体或测量目标来取得更有用的数据，并拓宽重力测量的领域。从前人测量的结果已经发现，在地面以下垂直方向移动仪器所得到的垂直重力变化与地面上自由空气垂直梯度值不等。地下重力垂直梯度值并不是一个常量，而是与测点所在间隔内的岩层

密度有一定的联系。到50年代初，哈默等人用地面重力仪在石灰岩矿井中垂向移动进行测量，以研究岩层密度计算值与实际值的差异。稍后，前苏联鲁卡夫琴柯等人开展了井下重力测量问题的研究工作，并在50年代中期开始制造井中测量用的石英重力仪。

1952年，吉尔伯特用他制造的振弦重力仪下到井孔中测量。这种仪器精确度虽然不高，但却开创了遥测型重力测井仪的先河，引起专业工作者们的极大兴趣。与此同时，史密斯较全面地论述了井中重力测量资料的各种应用问题。此后有十多年时间没有取得决定性的进展和突破，其原因有二：一是当时还不能制造体积和直径小到能够下到井孔中而且精度上也能满足要求的仪器；其二，除了知道能测定地层在压实效应下的真实密度值之外，人们因缺乏实践，对于重力测井究竟能解决哪些实际问题莫衷一是。直到60年代中期，美国地质调查所的地质学家麦卡洛发表了一系列关于井中重力测量对评价储集层方面的应用的文章，并提出了对地层密度分辨率和仪器测量精度的要求。

有了方法理论上的指导，目标就更明确了。当时就有壳牌石油公司在吉尔伯特仪器基础上改进制造出了精度约为1mGal的振弦式井中重力仪，并在井孔中作过试验。继而，埃索石油公司也推出了一个高精度的振弦式重力测井仪，该仪器曾在利比亚油田中使用过。使用后的结论是，重力测井仪测得的大体积范围孔隙度有利于对储集层的正确评价。埃索石油公司也制造并使用过这种类型的井下重力仪，但未见推广和改进的报道，而且不久就销声匿迹了。

正在这时，零长弹簧式地面重力仪已经达到了 μGal 级的精度水平，而且拉科斯特重力仪的体积尺寸比较小，有利于

改制为重力测井仪。在美国地质调查所的倡导下，拉科斯特—隆伯格重力仪公司用地面重力仪改制成第一台零长弹簧式重力测井仪，于1967年在现场试验中取得成功，接着第二台稍加改进的仪器为六家大石油公司所接受并用于生产。阿莫科公司用这台仪器发现了两个新油田，顿时名声大振。截止1981年，陆续生产了经过改进提高的小直径重力测井仪8台，分布在北美和世界其它地区使用。由于缩小了直径，提高了工作温度和井斜可调度，零长弹簧式重力测井仪的使用范围大大地扩展了。在获得了较广泛应用的十多年，以及在各种不同的探测目标应用实践之后，无论在理论、方法、数据处理、地质解释和仪器应用等方面都不断地得到充实和提高。

二、目前达到的水平

1) 仪器性能不断提高。有的用户设法减小拉科斯特重力测井仪的温度、方向、倾斜等外部因素对仪器读数的影响，测线标准误差可达 $2.6\mu\text{Gal}$ 。精心操作下一般的仪器测线标准误差在 $10\mu\text{Gal}$ 左右。小直径仪器可下在 $5\frac{1}{2}\text{in}$ 套管井中，添加专用绝热套后可测 200°C 的井段，井斜可调至 14° 。配用机械式井壁锁定装置使仪器在井中静止不动，就有可能在海洋平台上测井。实现了用微机控制操作、调平和读数，并可计算、显示和存储测量成果，减少了人为操作误差，提高了仪器的自动化程度和测量精度。

2) 方法理论日趋完善。分析在井下所得到的重力信息，经过各种校正，将有用的地层信息和附近地质构造的效应相分离。提出了较完整的构造效应概念和推导，以及对探测对

象——密度异常体的密度差、体积和距离等参数的定量计算方法和公式，开发了不少数据处理和地质解释的软件程序，同时还发展与其它测井方法的综合应用，取得了良好的效果。

3) 资料处理日臻先进。仪器配备微处理机后可在现场进行数据预处理及质量检查。室内资料处理方法也在不断地改进，编制各种计算和校正用的计算程序，在计算机上进行运算、质检、打印数据和自动绘图。对于复杂的构造校正和密度异常体的定量计算，采用二维模型人机联作，并正在发展三维模型。

三、重力测井的特点

1) 遥测的功能。万有引力的性质赋予重力测量仪器的探测范围广阔无垠，静止于井中的仪器不分遐迩地把近至井内的液体、套管、地层和隙间流体，远至地层和构造乃至整个地球甚至远到月球、太阳等天体的质量信息毫不遗漏地兼收并蓄。重力测井对地层密度异常体探测目标所接收的有用信息相对于这些强大的干扰背景是极其微弱的。在数据处理过程中，先将一些常规的外部影响加以校正，通过测点重力差的计算，地球的重力全量几乎全部被抵消，只剩与地层密度有关的重力垂直梯度变量和自由空气重力垂直梯度常量；然后，转换成以水平无限地层密度效应，再经构造效应的分离，可以将离井孔较远的密度异常体探测出来。这个有效的探测范围比起大多数测井方法来说要大得多，因此享有“遥测功能”的桂冠。

2) 大体积范围地层平均参数。对于非均质、多孔或碎

屑储集层来说, 由于探测半径大, 所测得的地层密度值或以此换算的孔隙度数据等更具有广泛的代表性和合理性。

3) 引力的不可屏蔽性。使重力测井法得以在套管井中探测套管外地层的孔隙带并区分隙间流体。

4) 相对高的测量精度。一般测量可达 $1 \sim 2 \times 10^{-8}$ 重力全量 (即 $10 \sim 20 \mu\text{Gal}$) 的量级, 精心操作的重复测量可以使精度达到重力全量的 5×10^{-9} 量级 (即 $5 \mu\text{Gal}$) 或更高一些。

5) 密度值准确度高。重力测井所得密度值是测点重力差 (SI 导出单位) 和深度差 (SI 基本单位) 的函数, 按公式直接计算而得, 排除了刻度转换的系统性传递误差。

6) 点测效率低。目前所用重力测井仪是静力重力仪, 不能在运动中测量, 幸而一般情况下都用于对有利的目的层或井段进行局部测试, 不致占用过多的时间和费用。

7) 测量成果解释的非单一性。这要采取与其它测井方法综合应用以及综合地质、地球物理的解释方法来解决。

四、重力测井解决油气和地学问题的能力

1. 油气勘探方面

- (1) 在生物礁体中遥测孔隙带;
- (2) 碳酸盐岩中检测裂缝性孔隙网络;
- (3) 判别储集层中的流体性质;
- (4) 在探井中精确地测定地层密度和孔隙度;
- (5) 探测套管外密度或孔隙度异常;
- (6) 在地震勘探资料贫乏或不佳地区改进构造图的正确性;

(7) 提供精确的地层密度，改善地面重力勘探的解释成果；

(8) 提供声阻抗资料，有助于改进高分辨率地震模型；

(9) 提高对岩层弹性常数与密度、孔隙度之间联系的认识；

2. 储集层评价、提高油气产量方面

(1) 精确评价砂岩和碳酸盐岩储集层的孔隙度；

(2) 用遥测孔隙度的方法寻找遗漏或旁窜的油气，扩大油田开采范围；

(3) 在生产过程中监测流体饱和度和气—油—水接触面的深度位置；

(4) 对新发现的油气储集层做精确的评价，以此制订开发计划。

3. 其它地学方面的应用

(1) 地下水方面用于大体积范围含水层的孔隙度和饱和度评价；

(2) 煤层分布和物理特性测定；

(3) 天然硫矿的储量测定；

(4) 地热开发中监测孔隙度随时间的变化；

(5) 核试验井周围地质构造情况调查；

(6) 储存核电厂废料地下储集场所的调查；

(7) 盐丘构造的深度形状及内含不纯物的勘查。

目 录

前 言

第一章 基本原理	(1)
一、万有引力和重力	(1)
1. 万有引力	(1)
2. 重力	(1)
二、重力加速度及其单位	(2)
三、国际正常重力公式(重力纬度效应)	(4)
四、自由空气重力垂直梯度(重力高度效应)	(5)
五、水平地层的重力效应(布格效应)	(6)
六、地下重力垂直梯度(重力深度效应)	(8)
七、地层密度值的计算	(8)
八、有效探测半径	(9)
九、构造效应	(14)
第二章 重力测井仪器	(19)
一、重力测井仪的发展与前景	(20)
二、埃索振弦式重力测井仪	(23)
1. 仪器原理	(23)
2. 仪器结构	(26)
3. 仪器的标定	(26)
4. 仪器的性能	(28)
三、拉科斯特重力测井仪	(28)
1. 原理	(28)
2. 结构	(45)
3. 测量范围和格值标定	(50)

四、自动重力测井仪·····	(51)
1. 原理 ·····	(52)
2. 结构 ·····	(56)
第三章 重力测井数据的误差分析 ·····	(58)
一、地层密度值与重力值、深度值的精度的关系·····	(58)
1. 重力值误差与地层密度误差的关系 ·····	(58)
2. 深度值误差与地层密度误差的关系 ·····	(60)
3. 地层密度值的总误差 ·····	(62)
二、重力测井数据误差和防范措施·····	(62)
1. 重力值的各种误差 ·····	(62)
2. 深度测定精度和方法 ·····	(76)
第四章 重力测井设计和作业方法 ·····	(80)
一、重力测井设计·····	(80)
1. 可行性调查 ·····	(80)
2. 测井方案的设计 ·····	(80)
二、测井前的准备工作·····	(83)
1. 重力测井仪的检查 ·····	(83)
2. 井口设备的检查 ·····	(84)
3. 井孔的准备 ·····	(84)
三、重力仪操作方法·····	(85)
1. 常规的操作步骤 ·····	(85)
2. 突掉的检测方法 ·····	(86)
第五章 数据处理和校正 ·····	(88)
一、现场数据处理·····	(88)
1. 读数—重力值的换算 ·····	(88)
2. 潮汐校正 ·····	(91)
3. 掉格校正 ·····	(93)
4. 重力测量精度 ·····	(95)
二、室内数据处理·····	(98)
1. 重力值和深度值的外部校正 ·····	(98)

2. 地层密度值的计算与作图	(103)
3. 地层密度值的校正	(109)
第六章 地质解释基础	(124)
一、定性解释	(125)
1. 岩性的划分	(125)
2. 判别地层中的孔隙流体	(127)
二、定量解释	(129)
1. 密度异常体几何尺寸、密度差和距离的关系	(129)
2. 地质体的密度效应	(134)
3. 储集层评价	(134)
4. 残余油饱和度的监测	(142)
第七章 在油气勘探和开发方面的应用	(147)
一、遥测判别套管外的天然气	(147)
二、寻找礁体构造中的储油气孔隙带	(151)
三、在碳酸盐岩中探测裂缝性等孔隙带	(159)
四、重力测井与脉冲中子俘获测井结合应用	(168)
1. 重力测井的局限性	(168)
2. PNC测井的局限性	(169)
3. 解决不定性	(169)
4. 现场实例	(170)
五、重力测井和深探测电测井的组合应用	(172)
1. 确定油气饱和度及孔隙度	(172)
2. 现场实例——探测遗漏的油气	(173)
六、在气田开发方面的应用	(176)
1. 气田概况	(178)
2. 重力测井的任务	(179)
3. 重力测井数据在储集层评价中的应用	(180)
4. 小结	(185)
七、对储集层中流体状态的监测	(185)
1. 油田残余油饱和度的监测试验	(185)

2. 储集层中油气水重新分布状态（或气锥）的	
监测试验	(186)
八、热采稠油热前锋测定的设想	(188)
第八章 在其它地学领域中的应用	(193)
一、测定核爆炸试验井周围的地质构造	(193)
二、核电厂废料地下贮存场的勘测	(198)

第一章 基本原理

一、万有引力和重力

1. 万有引力

重力测井是重力测量的一种特殊形式，是在重力勘探不断发展过程中派生的一个分支。它仍是以牛顿的万有引力定律为其理论基础的。在宇宙中，一个质点与一定距离的另一个质点之间存在着相互作用的引力，其表示式为：

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1.1)$$

式中 F ——两质点间的引力；

m_1 、 m_2 ——两质点的质量；

r ——两质点间的距离；

G ——万有引力常数。

大到宇宙中的天体，小到基本粒子，它们之间都存在着这种引力。

2. 重力

在地球上，人们感觉到并可以测出每个物体的重量。这主要是由于在地球半径 R 的距离内一定质量 m 的物体与地球整个质量 M （可认为集中在地心）的相互作用而产生的引力 F_E 所引起的：

$$F_E = G \frac{mM}{R} \quad (1.2)$$

但是，地球是一个以恒定角速度自转的椭球状行星，其表面上的物体随地球绕地轴转动，并受到一个垂直于地轴的离心力 F_c 的作用(见图1.1)，所以物体的重量也就是它受到重力 F_g 的作用力，即：

$$\vec{F}_g = \vec{F}_E + \vec{F}_c \quad (1.3)$$

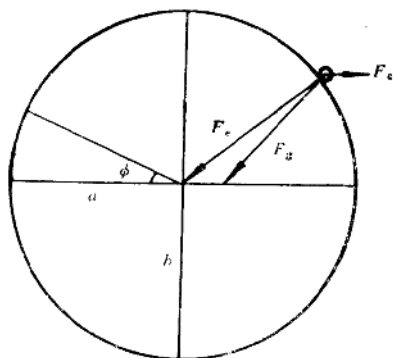


图 1.1 地球上物体所受到的作用力（重力的合成）

地球引力 F_E 的方向是指向地心，离心力 F_c 垂直于地轴，除南北极心和赤道圈以外，重力 F_g 则是稍稍偏离 F_E 的方向，并与地球理论椭球体上的物体所在的地表面亦即与当地的水平面相垂直。

二、重力加速度及其单位

16世纪末，伽利略在比萨斜塔上作自由落体试验，证实了落体在下降过程中的速度有规律地增大，这是物体受地球

引力的作用而产生的加速度。后来，牛顿的第二运动定律确切地导出了运动物体的质量 m 及其所受作用力 F 与产生的加速度 a 的关系式：

$$F=ma$$

对自由落体来说，重力 F_g 就是物体质量 m 和重力加速度 g 的乘积，即：

$$F_g=mg$$

$$\text{或} \quad g=F_g/m \quad (1.4)$$

当物体质量为单位质量值，或者在测量重力的仪器中，对重力敏感的重块质量为固定值时，重力加速度与重力的数值相等或成比例关系（两者的物理量纲是不同的）。在实际应用中，不是测量或计算与物体质量、万有引力常数有联系的重力的数值，而是用重力加速度这个物理量来表示重力的大小。在有关的专业文献中都采用重力加速度的计量单位。国际常用的重力加速度单位是以首先试验研究重力加速度的伽利略来命名的。取 1 cm/s^2 为 1 Gal （伽），地球重力加速度平均值为 980 Gal 左右。在重力勘探中常用单位为 mGal ， 1 mGal 约为地球重力加速度全量的百万分之一；在近期的

表 1.1 国际常用单位与我国新制订的法定重力加速度
计量单位的换算关系

国际常用单位	新法定单位
1伽(Gal)	$1 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$
1毫伽(mGal)=1/1000伽	$1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$
1微伽(μGal)=1/1000毫伽	$1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$

在本书中，考虑到本专业工作者的习惯以及为了印刷上的方便，仍采用国际常用的重力加速度计量单位并且和所有国际上地球物理文献一致。重力加速度当它作为定语时简称为重力。

精密重力测量和计算中则以 μGal 为单位， $1\mu\text{Gal}$ 约为重力加速度全量的十亿分之一。国际常用的和我国新制订的法定重力加速度计量单位的相互换算关系见表1.1。

三、国际正常重力公式（重力纬度效应）

几个世纪以来，许多科学家根据大量的大地测量、天文测量以及地球表面陆地和海洋上重力加速度的测量结果对地球的各种参数，诸如地球的质量、体积、平均密度和表面积等，特别是它的形状进行了研究。地球形状学指出：地球是一个椭球体，如图1.1所示，它的大半轴（即赤道半径） $a=6378.4\text{km}$ ，小半轴（地心到南、北极距离即极半径） $b=6356.9\text{km}$ ，地球的扁率为：

$$\frac{a-b}{a} = \frac{1}{297}$$

按照这方面研究的综合成果可推导出地球参考椭球体表面上的理论重力值的计算公式。知道了某一地点的纬度值 φ ，就可以算出该地点在海平面高度上的所谓正常重力值 g_0 。随着科学技术的进步，从本世纪初起，对公式的各项系数作了多次修改，1967年国际正常重力公式为：

$$g_0 = 978.0318(1 + 0.0053024\sin^2\varphi - 0.0000058\sin^2 2\varphi) \quad (1.5)$$

国际重力测量学术组织还专门发表了地球海平面上纬度每隔 $10'$ 的理论正常重力值表^[1]。重力勘探工作者可直接利用这个表以内插法对所测重力数据进行纬度校正，得出重力异常值。在重力测井工作中，虽然由于井孔在南北方向间的倾斜而造成同一井孔中各测点间只有很小的偏移，但对要求