

## 重力梯度测量的现状及复兴

曾 华 霖

**摘 要** 评述重力梯度测量的发展史，介绍重力梯度的各种应用，预测重力梯度测量的前景。由于重力梯度值或重力高次导数具有比重力本身高的分辨率，特别适合于探测或研究局部的小地质体及其细节；由于美国海军秘密重力梯度仪技术的公开，并投入工业应用，以及多种新型重力梯度仪正在加速研究，重力梯度测量在石油、金属矿勘探和小地质体探测以及研究方面必将起更重要的作用。

**关键词** 重力；重力梯度测量；重力梯度仪

## PRESENT STATE AND REVIVAL OF GRAVITY GRADIOMETRY

Zeng Hualin

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

**Abstract** In this paper, a historical review of the gravity gradiometry is given, the application of this technique to oil exploration and some other fields is described, and its development in future is predicted.

**Key words** gravity; gravity measurement; gradiometer

常规重力测量观测重力位的铅垂一次导数，即  $g$  或  $U_z$ 。重力梯度测量可以得到重力位的二次导数，如  $U_{xx}$ ,  $U_{xy}$ ,  $U_{xz}$ ,  $U_{yy}$ ,  $U_{yz}$  和  $U_{zz}$ ，它们是重力位的一次导数  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$  在  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向上的变化率。例如， $U_{xz}$ ,  $U_{yz}$  和  $U_{zz}$  是重力位的铅垂一次导数  $U_z$  在  $x$ ,  $y$  及  $z$  方向上的变化率；其中， $U_{zz}$  称为重力垂直梯度。

我国在五六十年代使用过的扭称，测量的重力场要素是  $U_{xz}$ ,  $U_{yz}$ ,  $2U_{xy}$ ,  $U_{yy} - U_{xx}$ ，不能测量  $U_{zz}$ 。20年代的美国，扭秤梯度仪是油气普查勘探唯一的有效工具。由于仪器笨重，效率低，梯度数据的解释方法研究又没有跟上，30年代以来被地震法、重力摆仪及重力仪所取代。然而，由于重力梯度值具有重力值所没有的独特的优点，重力梯度测量并没有消失，重力梯度值一直以不同的形式得到应用。70年代，美国海军的1项秘密技术——新型的重力梯度仪及三维重力梯度测量技术的公开，在海洋石油勘探及航空重力梯度测量领域开始得到应用，已经显示出良好的应用前

景。

根据最近的英文资料及国内发表的文献，综述了重力梯度测量的发展史、现状及未来的应用前景。

## 1 重力梯度测量的优越性

首先举一个理论例子〔1〕。一个剩余密度为正值的立方体引起的重力异常  $g$  或  $U_z$  是一些中心在立方体上方的同心圆，异常中心显示了立方体质量中心的水平投影位置，可以根据重力异常  $U_z$  估计这个物体的水平位置。但是，重力异常  $U_z$  对于场源体的棱边反映不灵敏，也不包含方向信息。重力梯度异常直接反映了立方体的棱边位置及形状，而不仅仅是质量分布。重力梯度测量得到的6个梯度值中， $U_{xx}$  和  $U_{yy}$  的异常梯级带、 $U_{xz}$  和  $U_{yz}$  异常极值的长轴方向可以反映立方体棱边的水平位置； $U_{xy}$  异常的极值点反映了立方体4个角点的位置； $U_{zz}$  的零等值线大致描述了物体的范围。这是因为重力位的二次导数对于物体的变化部分比较敏感，重力梯度与场源体的棱边、角点及质量中心有密切的关系。

这个例子说明，重力梯度异常能够反映场源体的细节，即具有比重力本身高的分辨率。这是重力梯度测量最主要的优点。常规重力仪只测量重力场的1个分量（铅垂分量），而1台重力梯度仪能够测量9个重力场梯度张量分量中的5项，梯度仪测量中多个信息的综合应用能够加强应用重力数据作出的地质解释〔2〕。特别是，梯度仪不像常规重力仪那样易受有害的、在运动环境（例如船和飞机）下的、大的运动加速度的影响。此外，重力梯度测量数据能够提高地质特征的定量模拟质量。

## 2 扭秤在初期石油勘探中的作用〔1, 3〕

匈牙利物理学家Baron von Eötvös设计了1台使石油工业发生革命的仪器——扭秤，并于1886年发表了他的发明。Eötvös在本世纪初评价了仪器对地质构造的灵敏度，于1908年发表了这个结果。第一次世界大战期间，应用扭秤成功地作出了在德国、匈牙利和捷克斯洛伐克与石油沉积有关的盐丘图。

紧接着一些国际石油公司，如Anglo-Persian公司应用几台扭秤进行了全球测量。1914年，进行了一些努力，企图把这个技术引进到美国，但是被战争推迟了。1922年，Eötvös扭秤由Shell和Amerada公司进口到美国。年末，横过Spindletop构造的试验性测量清楚地表明这个构造能够被扭秤发现。1924年，Amerada公司第一次发现了Nash盐丘，构造图是一幅简单而漂亮的矢量（箭头）指向穹隆中心构成的圆圈。后来又发现了其他一些盐丘和油田，如Lovell Lake油田、Texas和Houston油田。整个Los Angeles盆地和Texas的一部分都完成了详细的重力梯度图，测量精度达到  $\pm 1 E$ 。重力梯度测量是第一个广泛用于石油勘探的位场方法。当时，在寻找石油和天然气方面，扭秤还没有竞争者。约10 a以后，10亿桶以上的石油及至少79个产油构造的发现归因于扭秤的应用。

由于扭秤梯度测量的测量时间较长，测点附近的地形起伏影响相当严重，只能在

平缓的地区应用，以及梯度测量数据的解释方法研究没有跟上，从20年代末，被地震、重力摆仪及稳定弹簧重力仪所取代。在1940年以前，扭秤在美国进了博物馆，而在东欧它的应用长得多。

### 3 重力梯度计算值的应用

扭秤梯度仪没有得到广泛的应用，其原因并非重力梯度值本身没有价值，而是测量仪器的缺点。重力异常梯度的固有优势在于它是重力异常的变化率，反映了地下的密度突变引起的重力异常中的变化，因此具有比重力异常更高一级的分辨率。虽然没有方便的、高精度的梯度仪，但是，重力梯度值在国内、外一直没有停止使用。没有梯度实际测量值，人们就应用理论公式或频率域方法〔4〕，把重力异常测量值变换为

$$\frac{\partial g}{\partial z}, \frac{\partial^2 g}{\partial z^2}$$

各次导数，例如  $\frac{\partial g}{\partial z}$ ， $\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}$  等，在重力解释中加以利用。

近50年来，重力二次导数方法作为从叠加异常中分离局部异常的主要方法之一，一直在石油及金属矿勘探中，用于突出局部构造或岩体、矿体引起的局部异常，以发现它们的水平位置。至今，这个方法还没有失去它的作用。

重力梯度异常是应用重力法寻找断裂的主要因素。这是因为具有垂直位移的断裂可以看作是一些台阶，而重力梯度对于台阶的棱边特别敏感〔5〕。

根据重力剖面向上延拓值水平二次导数的零点位置的横向偏移，在已知模型顶面深度的条件下，可以求出水平板模型斜截面的倾角、水平厚度及位置〔6〕。

重力异常梯级带清楚地显示出大断裂的水平位置，然而，一些控制油气藏或矿体的次级断裂被较大的构造所掩盖。应用重力铅垂一次导数的相关分析法，能够有效地发现次级断裂〔7〕。

目前世界上应用较多的一种直接探测与油气藏有关的低密度体的方法，所采用的重力场要素就是经过归一化的重力梯度值〔8,9〕。

利用理论公式将重力异常变换为各种重力高次导数或重力梯度值，已经表现出比重力异常好的优越性。但是，计算值毕竟不是实测值。与实际测量值相比，计算值有两大缺点。第一，理论模型计算表明，由一些理论公式计算出的重力高次导数比模型理论值小许多，无法用于定量解释。与实测值相比，计算结果比较光滑、规整，缺少实际地质体引起的异常细节。以磁异常为例，由观测磁异常计算的1个铁矿的磁异常一次导数，比实测的磁异常一次导数简单得多，失去了许多异常细节，无法做出正确的推断〔10〕。第二，把重力异常变换为重力高次导数的频率域变换方法，实际上是1种高通滤波器。这个滤波器除了突出叠加异常中的局部异常外，首先放大了由比探测目标小的地质体所引起的重力效应及观测误差，计算出了许多虚假异常。这是重力数据处理、解释中经常面对的难题。

### 4 应用重力仪测量重力垂直梯度值

显然，实测值比计算值要准确、可靠得多。在重力场要素中，重力垂直梯度  $\frac{\partial g}{\partial z}$ ，即重力梯度在铅垂方向上的投影，比较容易测量。没有梯度仪，人们就利用1台重力仪在不同位置测量，用以计算梯度值。在1个测点的2个不同高度处的重力差

值除以高差，便可得到近似的重力垂直梯度。实际上，重力垂直梯度的测量已经有很长的历史〔11〕。

早在1881年，Jolly就利用大约高21 m的建筑测量了重力垂直梯度。1938年，Hammer利用290 m的高层建筑测量重力垂直梯度，观测精度达到 $\pm 3 E$ 。1943年，Thyssen利用GRAF重力仪及高差为0.5 ~ 1.5 m的移动三角架，在野外观测重力垂直梯度，平均测量精度为 $\pm 50 E$ 。1953年，Houston技术实验室利用Worden重力仪，在3.5 m高的三角架上面进行观测，梯度值的观测精度为 $\pm 37 E$ 。

1956年，Thyssen等首次利用重力垂直梯度研究Calgary市Turner谷地的地质问题。使用了Worden重力仪及4 m高的三角架。梯度值的平均观测精度为 $\pm 10 E$ 。1972年Neumann，1976年Fajklewicz等应用垂直梯度探测近地表的小地质构造、岩石的蚀变、洞穴、隧道等。1985年，Introcaso和Huerta利用垂直梯度为工程地基确定浅部结晶基底的形态。

重力垂直梯度的测量利用特制的塔来实现，这些塔的高度从10 m〔12〕到0.876 m不等〔13〕。在Caucete地震之后，Volponi和Introcaso测量了阿根廷San Juan地区的垂直梯度，采用了1 m高的塔，在每个点以20 cm间隔读取5个连续的数；然后应用最小二乘法得到梯度值。

中国的重力垂直梯度测量工作开展得比较晚，都属于研究性质〔11〕。例如，1973年，长春地质学院与陕西省第二物探大队合作，在秦岭进行了观测。1974年，长春地质学院与西藏地质局物探大队合作，在藏南及藏北进行了观测。1980 ~ 1983年，成都地质学院在全国较大范围内进行了重力垂直梯度观测。

目前，重力垂直梯度测量已经用于解决下列问题：探测浅部地质或人工微小构造；探测小型断裂；在坑道中确定上下两坑道间的密度值；确定小地质体的位置；对高精度重力测量进行垂直梯度校正等等。

## 5 新型的美国海军重力梯度仪

在70年代，出于对导航和导弹发射的需要，美国海军花费了10亿美元研究1个测量重力梯度的系统〔1, 14〕。美国政府有1项在3种竞争的梯度仪设计之间的“决赛”计划。

决赛的胜利者是Bell梯度仪；Bell梯度仪现在已经有几种工作仪器。另外两种设计（由Hughes Aircraft及MIT研制）至今还没有工作仪器。这个计划开始以来，这些传感器一度为国防秘密；冷战结束，这项军事技术开始用于勘探地球物理及其他领域。3 a前，美国海军开始探索把这一潜水艇重力梯度技术作为民用。

三维重力梯度测量是Bell Aerospace公司为美国海军Trident潜艇计划研究的一项秘密技术。重力梯度仪由12台分开的重力仪组成，当这些重力仪在“罗经柜”（binale）中翻转时，便测量了1 m内地球重力的差值。结果得到重力、重力场的全部张量或重力随方向的三维变化的精确测量值。因此，重力梯度测量有可能以比从前高得多的分辨率和精度绘制出盐丘以下的密度差图。在墨西哥湾的测量表明，梯度测量的精度估计为每1 km范围内0.5 E，大约相当于 $0.05 \times 10^{-5} \text{ m}/(\text{s}^2 \cdot \text{km})$ 。Bell Geospace公司已经应用美国海军船只在墨西哥湾深水中进行了3次重力梯度测量。

现在正在使用的37种重力仪器中，梯度仪有4种〔14〕：美国Lockheed Martin Federal Systems Niagara Operations公司（以前属于Bell Aerospace公司），根据Paired旋转

加速计原理研制的GGSS及GSS型梯度仪，已经生产了3台；美国Bell Aerospace公司根据Paired旋转加速计原理研制的FTD?3D型梯度仪，已经生产了1台；前苏联地球物理勘探方法研究所根据振动弹簧原理研制的Magistr梯度仪；中国地质部系统根据振动弹簧原理研制的海洋梯度仪。

然而，现在正在研制的的梯度仪有18种(文中列举的前16种是相对测量梯度仪，后2种是绝对测量梯度仪)之多〔14〕：(1)美国麻省理工学院(MIT)根据液体漂浮原理研制的运动型梯度仪；(2)Amoco公司根据液体漂浮原理研制的运动型梯度仪；(3)JILA根据液体漂浮原理研制的静止型梯度仪；(4)Amoco公司根据光弹性扭矩原理研制的运动型及井中梯度仪；(5)System Planning公司根据自旋扭丝原理研制的SRGG运动型梯度仪；(6)西澳大利亚大学根据低温加速计原理研制的运动型梯度仪；(7)Oxford Instruments公司根据低温加速计原理研制的运动型梯度仪；(8)MD大学根据低温加速计原理研制的梯度仪；(9)Los Alamos根据低温加速计原理研制的运动型梯度仪；(10)Two-Sensor GWR?C公司根据低温磁力旋浮原理研制的运动型梯度仪；(11)Project Avoss根据低温弹簧原理研制的运动型梯度仪；(12)Canagrav Research公司根据惯性导航系统加速计原理研制的运动型及井中梯度仪；(13)Dynamics System公司根据纤维光学原理研制的静止及运动型梯度仪；(14)Texas Arlington大学根据自转扭力矩原理研制的运动及井中梯度仪；(15)ONERA根据电容旋浮加速计原理研制的运动型梯度仪；(16)John Hopkins应用物理实验室根据蓝宝石共振加速计原理研制的运动型梯度仪；(17)Arthur D.Little的Stone根据双自由落体反射体原理研制的运动及静止型梯度仪；(18)Dunlap Arthur D. Little的Dunlap根据双自由落体反射体原理研制的运动及静止型梯度仪。

上述情况表明，现在正在使用的37种重力仪器中，梯度仪只有4种；正在研制的24种重力仪器中，重力梯度仪占了18种，而重力仪只有6种。由此可见重力仪器研究的趋势，这也反映了重力梯度测量复兴的势头。

## 6 重力梯度仪测量数据的应用

重力梯度仪测量目前还是小规模。下面是几个应用例子。

### 6.1 寻找油气田〔1〕

重力梯度能够改进地震法难以作出的盐层底部的图像。应用标准重力，不能反演出盐层侧面的陡度、浅部形态的细节及最大深度；而重力梯度的反演可以很好地解决这个问题。

重力梯度测量对于油气藏具有随时间变化的监测能力。重复重力梯度测量可以监测生产过程中石油的移动轨迹等。

在Mars油田，用东西方向排列的两台重力梯度仪测量出Mars盆地与之北部和南部盐丘的交界，观测到的盆地中心下倾的密度边界与地震确定的油水接触带符合。

### 6.2 改进重力解释的结果

重力梯度测量数据或者重力数据变换为垂直梯度，能够有效地进行三维处理以描述密度间断。解析信号和水平梯度极大值以及Euler反褶积方法对重力场及其水平梯度的联合应用所进行的模型研究表明，比只应用重力能够提供具有更满意精度的信息〔15〕。

Cordell和Grauch(1985)提出了一个寻找地下岩石密度及磁化强度突变的方法，

这个方法应用磁或重力异常水平梯度极大值的位置〔16〕。Blakely和Simpson(1986)把Cordell和Grauch的方法自动化,并与其他方法一起,用于求美国的均衡剩余异常数据。Hansen等(1987)首先讨论了把解析信号和水平梯度极大值联合用于三维重力解释,主要是识别密度边界及地质接触带的倾斜方向〔17〕。

### 6.3 研究基底起伏

利用Bell航空重力梯度测量系统(GGSS)记录的重力梯度张量的对角线元素,用于确定Southwestern Oklahoma的基底起伏〔18〕,梯度观测误差为12.0 E。这个结果同一系列现有的基底油井深度及与在这些火成岩地区的推断的断裂符合。

### 6.4 航空重力梯度测量

航空重力梯度测量对于困扰航空重力测量的定位误差并不灵敏,没有垂直起伏及Eotvos误差,因此航空重力梯度测量将会得到迅速发展。

## 7 结论

由于下列几个因素:(1)重力梯度异常所固有的超过重力异常的高分辨率等优势;(2)石油、矿产勘探及地质构造研究对重力法提出的研究小地质体及其细节的要求;(3)被上述因素所鼓励的新型重力梯度测量系统的加速研制,重力梯度测量必将有一个划时代的发展。

虽然,重力仪测量将继续发挥其作用,但是,重力梯度仪的应用必将对地球物理和大地测量作出重要的贡献。不过,现在重力梯度测量数据的解释方法在应用方面都还不成熟,还处在发展阶段。

对于我国来说,当前要做两件事:加速重力梯度仪的研究;加强精确的重力梯度数据的处理方法和解释理论的研究。让我们迎接新的重力梯度测量时代的到来!

**作者简介** 曾华霖,男,1939年5月出生,四川省新都县人。1960年毕业于北京地质学院构造(石油)物探专业。现为中国地质大学(北京)应用地球物理系教授。1983年以来,在重磁资料数据处理、解释及应用方面个人及合作发表专著和译著6本;以第一作者(成果的主要完成者及笔者)在国内外发表英文论文约10篇,中文论文约20篇。

作者单位:曾 华 霖 (中国地质大学,北京 100083)

## 参 考 文 献

[1] Bell R E, Anderson R, Pratson L. Round Table: Gravity gradiometry resurfaces. *The Leading Edge*, 1997, 16(1):55 ~ 59

[2] Pawlowski B. Gravity gradiometry in resource exploration. *The Leading Edge*, 1998, 17(1): 51 ~ 52

[3] Bell R E, Hansen R O. The rise and fall of early oil field technology: The torsion balance gradiometer. *The Leading Edge*, 1998, 17(1):81 ~ 83.

[4] 《重力勘探资料解释手册》编写组. 重力勘探资料解释手册. 北京:地质出版社, 1983. 92 ~ 97

- [ 5 ] Dwain K B.Generalized gravity gradient analysis for 2?D inversion.Geophysics , 1995 , 60(4):1018 ~ 1028
- [ 6 ] McGrath P H.Dip and depth extent of density boundaries using horizontal derivatives of upward-continued gravity data.Geo-physics , 1991 , 56(10) : 1533 ~ 1542
- [ 7 ] Zeng H, Zhang Q , Liu J.Location of secondary faults from cross-correlation of the second vertical derivative of gravity anomalies. Geophysical Prospecting, 1994,42:841 ~ 854
- [ 8 ] 别列兹金著.物探数据的总梯度解释法.陆克 , 刘文锦 , 焦恩富译.北京 : 地质出版社 , 1994
- [ 9 ] 李小孟 , 曾华霖.高精度重力资料在胜利油区油气藏探测中的应用.现代地质 , 1996 , 10 ( 2 ) : 250 ~ 259
- [ 10 ] 熊光楚.位场的计算结果与实际观测结果的差别.物探化探计算技术 , 1990 , 12 ( 3 ) : 185 ~ 190
- [ 11 ] 王宝仁 , 徐公达.高精度重力测量.北京 : 地质出版社 , 1995 . 122 ~ 125
- [ 12 ] Kumagai N, Abe E , Yoshimura Y.Measurement of vertical gradient of gravity and its significance.Boll Geofis Teor Appl, 1960 , (2):607 ~ 630
- [ 13 ] Ager C , Liard J.Vertical gravity gradient survey: Field results and interpretations in British Columbia.Geophysics,1982 , 47:919 ~ 925
- [ 14 ] Chapin D.Gravity instruments: Past, present, future.The Leading Edge , 1998 , 17 (1):100 ~ 112
- [ 15 ] Marson I , Klingele E E.Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation.Geophysics, 1993 , 58(11): 1588 ~ 1595
- [ 16 ] Cordell L , Grauch V J S.Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in San Juan basin , New Mexico,in Hince, W. J., Ed., The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps: Soc Expl Geophys, 1985 . 181 ~ 197
- [ 17 ] Hansen R O,Powlowski R S, Wang X.Joint use of analytic signal and amplitude of horizontal gradient maxima for three-dimensional gravity data interpretation:57th Ann Internat Mtg,Soc Explo Geophys,Expanded Abstract,1987.100 ~ 102
- [ 18 ] Vasco D W , Taylor C.Inversion of airborne gravity gradient data, southwestern Oklahoma.Geophysics , 1991 , 56(1):90 ~ 101

998年9月30日收稿。