

# 垂直形变监测中引入重力观测值的可行性研究\*

薄志鹏 刘国辉

(武汉测绘科技大学地学测量工程学院,武汉市珞喻路 39号, 430070)

**摘要** 全面分析重力测量的各种误差和目前能达到的精度后,对垂直形变监测中引入重力观测值的可行性进行了具体研究。结果表明,若仅是为了测定点的垂直位移的高程速率,增加重力测量数据后对形变分析的精度增益十分有限。但是对于大跨度垂直形变监测和局部地区突发性垂直形变测定,重力测量方法可以及时掌握垂直形变的趋势。

**关键词** 垂直形变监测;重力梯度;高程速率

**分类号** P223

众所周知,垂直形变监测中引入精密重力测量的可行性主要取决于重力测量的精度和如何正确求定重力高度因子。本文就上述两个问题进行讨论,以期能获得明确的结论。

## 1 关于重力测量的精度

重力测量的误差来源大致分为仪器误差影响和外界干扰因素两部分。下面就 LCR-G型重力仪进行分析。

### 1.1 仪器误差影响

已知的仪器误差有:

1) 读数误差 LCR-G的读数误差约 $\pm 0.5\sim 1.0\mu\text{Gal}$  ([1, 7], Weichel, 1980)

2) 置平误差 仪器置平误差不仅使仪器的灵敏度发生变化 (Gerstenecker, 1973),而且使仪器读数产生误差 (Groten, 1980):

$$m_g^w \sim g \frac{T}{d^2} m^T$$

式中  $T$  为倾角,  $g$  为地球重力加速度,  $m^T$  为置平误差。置平误差对重力差测定的影响约为  $1\sim 3\mu\text{Gal}$

3) 电压变化的影响。不少学者的专项实验结果表明,若电压稳定在  $12V \pm 0.5V$  以内,电压变化的影响不大于  $\pm 1\mu\text{Gal}$

4) 弹性后效 作用力的变化使弹簧产生弹性变形,从而引起弹性后效。一般认为采取松摆 5min 后进行读数,并使用低通滤波器后,弹性后效的影响不大于  $\pm 2\mu\text{Gal}$

5) 校正函数的误差。校正函数包括一次和二次校正函数项以及周期校正函数项。对于 LCR-G85而言,顾及二次项后重力差的一次测量中误差明显减小。当采用精确求定的一、二次校正函数时,其误差影响可望减小到  $\pm 0.2\mu\text{Gal}$ (重力差为  $10\text{mGal}$ )和  $\pm 2\mu\text{Gal}$ (重力差为  $100\text{mGal}$ )。研究表明,周期项改正的残差不大于  $\pm 2\mu\text{Gal}$ <sup>[1, 7]</sup>。

收稿日期: 1996-01-08. 薄志鹏,男,62岁,教授,现从事大地测量研究。

\* 国家测绘局“八五”重点科技攻关资助项目,编号 C85-07

## 1.2 外界干扰因素

外界干扰因素主要是指温度、磁场、震动、大气压、土壤湿度、地下水位变化、极移和地球内部质量迁移。图1是部分非固体潮引起重力变化原因及其量级。

1) 温度变化 测量弹簧的弹性参数与温度有关,温度变化时重力仪的显示值会发生变化。虽然LCR重力仪内部装有恒温器,但是外部温度变化剧烈时仍会引起仪器内部温度的变化。

Izutuya Boedecker Brein和Kiviniemi等人的实验都证实了这一点,并得出外部温度变化产生的读数变化约在 $+0.6\text{--}1.6\mu\text{Gal}^{\circ}\text{C}$ 之间。

2) 大气压变化 大气压变化一方面改变了作用在摆杆上的浮力,从而影响重力仪的读数,另一方面大气压变化引起引力变化和地壳变形。前者虽然在仪器结构上采取了一定的防护措施,但是实验表明,当气压变化较大时,这种影响不能忽视。对于后者,气压变化引起大气质量迁移,理论上会产生 $-0.43\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ 的直接影响,但同时出现的地壳变形和地下水位变化可使气压影响减小至 $-0.2\text{--}0.3\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ 。Gerstenecker曾根据资料求得回归系数为 $-0.35\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ 。按汉诺威固体潮站7台重力仪记录到的52~410次观测数据,算得的系数为 $-0.40(\pm 0.06)\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ (Torge和Wenzel 1977)。利用上述系数可按下式将观测值归化至测站标准大气压 $P_0$ :

$$P_0 = 1013.25(1 - 0.0065h/288.15)^{5.2559} \text{ mbar} \quad (1)$$

$$W_{g_p} = 0.4(P - P_0)(\mu\text{Gal}) \quad (2)$$

式中, $h$ 为测站高程,( $P - P_0$ )以mbar为单位。前不久Wenzel又提出,在一般情况下,式(2)中的回归系数取0.3(Wenzel, 1991)较好。线性回归模型可能有10%的误差。

3) 磁场影响 LCR重力仪经生产厂消磁、测量系统装备磁屏蔽装置后,重力仪读数受地磁场的影响大大削弱。图2显示一般地磁改正只是在大范围测量和场强较大时才需要<sup>[1]</sup>。

4) 振动影响 Kanngieser在实验室内用振动平台模拟各种运输工具(飞机、汽车、人工等)与外界条件下的振动影响,认为振动与重力仪读数之间没有相关性,故无法建立数学模型。通过野外实验,Kanngieser得出,在目前条件下,振动影响约为 $\pm 3\text{--}10\mu\text{Gal}$ ,关键在于仪器包装和运输设备的改进。

5) 土壤湿度与地下水位的影响 土壤密度的变化主要是含水量的变化,即土壤湿度变化。土壤湿度与天气状况、土层所处位置有关。在均质平面层假设下,地面点重力受土壤湿度的影响为:

$$W_{g_f} = 2\pi G\theta H(1 + \frac{H}{2R^2}) \approx 2\pi G\theta H \quad (3)$$

其中 $\theta$ 为土壤密度, $H$ 为土层厚度, $R$ 为平面层半径。类似地可写出地下水位变化的影响为:

$$W_{g_w} = 2\pi G\theta PWH \approx 4.2PWH \quad (4)$$

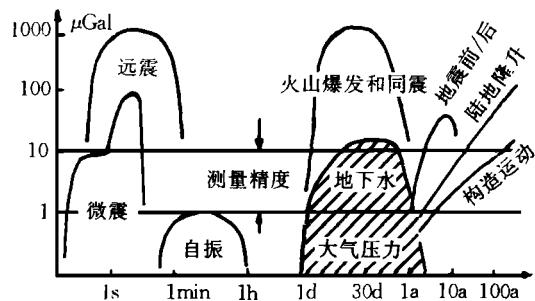


图 1

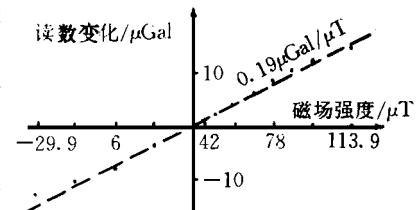


图 2

式中  $WH$  为水位变化,  $P$  为孔隙度。汉诺威大学根据实测地下水位进行改正, 观测中误差自  $\pm 7\mu$  Gal 降至  $\pm 6\mu$  Gal, 改正量在  $-5\sim +5\mu$  Gal 之间。

在实际作业时, 由于土壤湿度及其层厚、地下水位等难以掌握, 故采取计算改正数的方法难以实现。

6) 极移的影响。惯性加速度中的 Coriolis 项和 Euler 项很小, 对重力测量的影响可略去不计。极移对重力矢量的垂直分量的影响为 (Richter, 1988):

$$W_{\text{pol}} = 1.2k^2 r \sin 2h (x_p \cos \lambda - y_p \sin \lambda) \quad (5)$$

其中  $\lambda$ 、 $h$  为点的地心经纬度,  $x_p$ 、 $y_p$  为极点坐标,  $r$  为点至地心的距离。计算表明, 1991.00 至 1991.95 年间极移对武汉地区重力测量的影响达  $9\mu$  Gal, 极移的最大影响可达  $13\mu$  Gal。

综上所述, 可以得出目前用 LCR-G 重力仪进行相对重力测量所能达到的精度 (见表 1)。表 1 中所列作业条件是指仪器校正质量、误差修正、交通状况 (运输工具, 仪器包装, 点距, 道路状况等)、测站环境和人员素质等。

表 1

序号	误差来源	量 级 $\mu$ Gal		
		一般作业条件	困难地区	良好作业条件
仪器误差				
1	读数误差	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$
2	置平误差	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 2$
3	弹性后效	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 1$
4	电压不稳定	$\pm 1$	$\pm 1$	0
5	一、二次校正函数	$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 5$
6	周期误差	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 1$
外界干扰				
7	气压	$\pm 1$	$\pm 2$	0
8	温度	$\pm 3$	$\pm 8$	$\pm 3$
9	固体潮	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$
10	震动 (振动)	$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 5$
11	极移	$\pm 3$	$\pm 3$	$<\pm 1$
12	大质量迁移	$\pm 0.5$	$\pm 2$	$\pm 0.5$
13	地磁 (环境磁场)	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 1$
14	土壤湿度与地下水	$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 1$
	总误差	$\pm 11$	$\pm 20$	$\pm 8$

在上述各种误差因素中, 除最后 4 项外均属随机误差, 因此, 增加仪器数和独立重力差观测数可以提高测段重力差的精度。对于垂直形变监测网而言, 重要的是测段重力差之差的测定精度。若在布测时充分注意测站环境和作业季节的选择, 使部分误差 (如最后 3 项误差) 对各次重力测量的影响属强相关的, 则它们的影响在结果中将得到较好的抵偿。

## 2 关于重力高度因子的确定

根据重力与高程变化的关系 (重力高度因子), 可以把重力变化转化为高程变化。点的高程变化等于大地水准面随时间的变化和点垂直位移之和, 一般认为前者可略去不计<sup>[2, 4, 6, 8]</sup>。在大区域地壳垂直运动时, 重力高程变化接近布格模型<sup>[3, 5]</sup>, 即

$$C \sim \frac{\partial g}{\partial h} + \bar{z} f W$$

其中,  $\frac{\partial g}{\partial h} \approx -3\mu \text{ Gal/cm}$  为自由空气重力梯度,  $W$  为岩石密度, 其它符号同前。  $C$  与所注入质量的密度有关, 但与注入体的深度无关。当  $W$  取  $2.6 \text{ g/cm}^3$  时,  $C \approx -2\mu \text{ Gal/cm}$ ; 当无质量注入时(纯点垂直位移)  $C \approx -3\mu \text{ Gal/cm}$

目前观测到的重力高度变化的比值约为  $-2\mu \text{ Gal/cm}$ , 如冰岛北部欧亚板块与北美板块边界上, 1975~1980 年期间测得为  $-1.8 \pm 0.2\mu \text{ Gal/cm}$ ; 斯堪的纳维亚(1966~1982)为  $-1.9\mu \text{ Gal/cm}$ (Groton, 1983); 芬兰 1987~1991 年大地测量国家报告中指出, 抬升与重力变化的比值是  $-0.24 \pm 0.03\mu \text{ Gal/mm}$  但是在日本伊豆半岛也出现  $-3.0\mu \text{ Gal/cm}$ (Hagiwara, 1980)的情况。

1990 年我国国家测绘局与芬兰大地测量研究所合作, 使用绝对重力仪 JILA-5 测定我国 8 处的绝对重力值和重力梯度。8 地的重力梯度平均值为  $-302.4\mu \text{ Gal/m}$ , 最大互差达  $-159.7\mu \text{ Gal/m}$

目前确定  $C$  的方法大致有以下几种: 直接采用自由空气模型的理论值  $C = -3.08\mu \text{ Gal/cm}$ ; 在具有大量重力和水准复测资料的情况下, 推求区域的平均  $C$  值; 采用回归分析法计算点  $i$  的  $C_i$  值; 在平差计算时将  $C_i$  作为未知数等。对于以上几种方法本文不作进一步讨论, 而是建议直接按布格模型来确定  $C_i$  值, 即

$$C = \left( \frac{\partial g}{\partial h} + 2fW \right)$$

其中第一项可以在测站上直接测定, 而第二项的  $W$  可取自岩石学的有关资料。于是可算得  $C_i$  值, 估计  $C_i$  值的相对中误差约为  $1/40$ 。显然, 无论是按精度或可靠性考虑, 直接求定法所得的  $C_i$  值较好。

由部分国家的研究结果可知, 大区域长期重力变化的量级约为  $1 \sim 10\mu \text{ Gal/a}$ , 大致与目前一般地区相对重力测量的精度相当; 短期和突发性的变化大多数出现在局部区域, 通常与特殊的地壳运动(火山爆发、地震等)相关。在这种情况下可能出现  $0.1 \text{ mGal}$  甚至更大的重力变化。所以, 尽管目前重力测量的精度还有限, 但是对大区域长期监测而言, 若复测周期较长, 则有可能通过重力测量数据和相应的重力高度因子获得有关地壳垂直运动的有益信息。对于局部区域的突发性地壳形变, 由于此时形变量一般较大, 故可以较好地发挥重力测量的快速机动性, 及时获取地壳形变的资料。

### 3 垂直形变监测中引入重力观测值的可行性分析

众所周知, 水准测量精度估算是一个十分复杂的问题。在此我们只介绍两种估算公式, 其一是 Pelzer 教授提出的估算公式:

$$m_{h_1} = \left[ \frac{S}{2d} \left( 1 + \frac{S}{2d} q^2 \right) \right]^{1/2} \cdot mx \quad (6)$$

其中  $S$  为水准路线长度,  $d$  为视距,  $q$  是一测站观测系统误差与偶然误差之比值,  $mx$  是一测站高差观测中误差。若取测站数  $n = S/2d$ , 对精密水准测量而言, 按 Pelzer 取  $mx = \pm 0.1 \text{ mm}$ ,  $q = 0.05$ , 则式(6)可化简为:

$$m_{h_1} = \pm 0.005n \quad (7)$$

考虑到我国一等水准测量平均每  $1 \text{ km}$  的测站数为 17 站, 故式(7)又可写成:

$$m_{h_1} = \pm 0.085S_{\text{km}} \quad (8)$$

另一个是目前较多国家采用的水准测量精度估算公式,即

$$m_{h_2} = f \sqrt{S}, f = \sqrt{Z + e^2} Z \quad (9)$$

其中  $Z$  为水准测量  $1\text{km}$  的偶然中误差,  $e$  为每  $1\text{km}$  水准测量的系统中误差,  $Z$  为系统误差的可能累积长度 ( $\text{km}$ )。一般取  $Z = \pm 0.5\text{mm/km}$ ,  $e = 0.05\text{mm/km}$ ,  $Z \approx 300\text{km}$ , 于是有:

$$m_{h_2} = \pm 1.0 \sqrt{S} \quad (10)$$

式(10)也是我国以前采用的一等水准测量精度估算式。按式(8)和(10)可绘出图3

由式(8)和图3可知,按 Pelzer 公式  $m_{h_1}$  是距离的线性函数,显然对水准测量的精度估计过于悲观。该式与实际统计结果不符,因此以下我们将以式(10)为准讨论水准测量的精度。目前对重力测量的精度估计大致可以归纳成表2

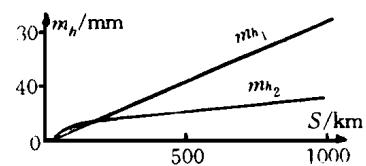


图 3

表 2

相对重力测量 (LCR-G)		绝对重力测量	
± 12 <sup>4</sup> gal	W. Torge	± 1~2 <sup>4</sup> Gal (FG-5)	胡明城
± 8 <sup>4</sup> Gal(良好作业条件下)		± 3~4 <sup>4</sup> Gal (JILA g3)	
± 1 <sup>4</sup> Gal(一般作业条件下)	本文估计	± 5.2 <sup>4</sup> Gal (JILA g3)	W. Torge
± 20 <sup>4</sup> Gal(较困难作业条件下)		± 10 <sup>4</sup> Gal (JILA g3)	江志恒
± 20 <sup>4</sup> Gal(我国一等重力测量)		± 10 <sup>4</sup> Gal (JILA g5)	J. M. aikinen
± 13 <sup>4</sup> Gal(基本网)	江志恒	—— 不确定度	
± 12 <sup>4</sup> Gal(短基线)		± 10 <sup>4</sup> Gal (NIM)	计算院

设  $P_{hn}$ ,  $P_{hg}$  分别为同一路线长度水准复测高差之差的权和由重力段差复测差算得的高差变化的权,并令  $P_{hn} = k P_{hg}$  ( $k$  为任意正数),由此有:

$$m_{hg} = m_{hn} \sqrt{\frac{1}{k}}$$

考虑到式(10),则有:

$$m_{hg} = \pm \sqrt{2kS}, m_g = Cm_{hg} / \sqrt{2} \quad (11)$$

对于不同的路线长度、 $k$  值和  $C$  值可绘出图4和图5。由图可知,只有当  $C$  值接近  $0.3^4 \text{ Gal/mm}$ ,  $k \geq 4$  和  $S > 600\text{km}$  时,才有可能在垂直形变监测网中引入重力测量数据。然而模拟计算表明,当  $k \geq 4$  时,即使在垂直形变监测网设计时采用良好的设计矩阵,引入重力测量观测值所产生的增益一般不会大于  $10\%$ ,对速率的精度提高也十分有限。

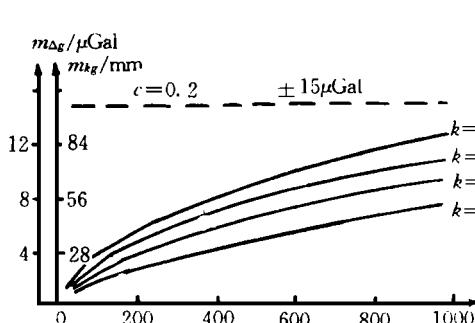


图 4

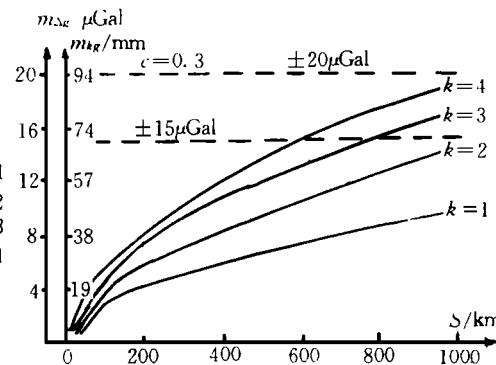


图 5

## 4 结论和建议

1) 目前相对重力测量(用 LCR-G)的中误差视作业条件而异, 大致在 $\pm 10\text{--}20\text{ Gal}$  绝对重力测量的中误差约为 $\pm 3\text{--}5\text{ Gal}$

2) 对垂直形变监测网而言, 若仅是为了测定点的垂直位移和高程速率, 只要采用精密水准测量就可以了。一般来说, 增加重力测量数据后对垂直位移和高程速率精度的提高十分有限。

3) 严格来说, 高程变化与重力变化之间的关系在空间和时间上可能是相当复杂的。如果想依据重力变化来推断高程变化就需要建立一个地球物理模型。在大地水准面的长期变化不大的前提下, 目前用精密水准测量监测地壳垂直形变的方法是有效的。

4) 对于大跨度垂直形变监测而言, 在条件许可的情况下, 采用绝对重力测量方法测定点的高程变化, 建立参考基准是有重大意义的, 对此还有不少地球物理学问题需要进一步研究。

5) 某些特殊活动构造地区突发性(孕震期)和长期地壳垂直运动(如青藏地区抬升运动), 由于其形变量一般较大, 虽然重力测量精度有限, 但仍能及时测定垂直形变的重要数据。

## 参 考 文 献

- 1 Kanningieser E. Untersuchungen zur Bestimmung Tektonisch Bedingter Zeitlicher Schwere- und Hohenänderungen in Nordisland. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 1982(114)
- 2 张正禄. 监测大区域地壳垂直形变的重复精密重力和水准测量联合平差模型. 测绘学报, 1986(3)
- 3 张正禄. 重复精密重力测量对水准测量平差成果的加强和改善. 测绘学报, 1987(1)
- 4 Bonatz V M. Der Gravitationseinfluss der Bodenfeuchigkeit. ZfV, 1967(4)
- 5 Wenzel H G. Nutzung von Schweremessungen für die Bestimmung Rezenter Krustenbewegungen. Rezente Krustenbewegungen 1989(39)
- 6 Heck B. Zur Bestimmung Vertikaler Rezenter Erdkrustenbewegungen und Zeitlicher Änderungen des Schwerfeldes aus Wiederholten Schweremessungen und Nivellements. DGK Reihe C, 1984(302)
- 7 Torge W. Gravimetry and Tectonics. Geodesy and Geophysics, 1993(115)
- 8 Vanicek P. Four-dimensional Geodetic Positioning. Report of the IAG SSG 4. 96, 1987
- 9 徐培亮. 重力与水准测量数据的联合处理: [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1989
- 10 Makinen J. The Sino-finnish Absolute Gravity Campaign in 1990. Helsinki Publications of the Finnish Geodetic Institute, 1993(116)

## Investigation of the Feasibilities Associated with the Use of Gravity Observations in the Vertical Deformation Analyses

Bo Zhipeng Liu Guohui

(School of Geo-science and Surveying Engineering, W TU SM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

**Abstract** The investigation of the feasibilities associated with the use of gravity observation in vertical deformation analyses has been conducted through the complete estimates of error effects and obtainable accuracies in gravity observations. It

(下转第 257页)

件,也对该网进行了计算。从结果看,平面坐标、大地高及其中误差均完全相同,原来失真的缩放系数(尺度因子)从164ppm变成了真实量,而旋转角也有一微小的变化,从而证明了该软件的正确性。

从以上推导过程可以看出,本文提出的GPS后处理网平差模型是一个简便实用的模型。它以当地平面坐标和大地高作为平差计算的参数,另外它采用数值微商方法回避了繁琐的空间坐标对高斯坐标偏导的计算。该方法也可在其它复杂的偏导计算中应用。计算实例证明,该模型是正确的。

### 参 考 文 献

- 1 金国雄等. GPS网平差软件包 TGPPS 见: GPS卫星定位的应用与数据处理. 上海: 同济大学出版社, 1994.

## A Simple and Practical GPS Network Adjustment Method

*Wang Jielian*

(Dept. of Surveying, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai, China, 200092)

**Abstract** The numerical partial derivative is introduced to simplify the GPS network adjustment model. And the plane coordinates and geodetic heights are selected as adjustment parameters to make the GPS post network adjustment model easily changed to plane or height network. Additional observables can also be readily introduced. The solution to networks with big rotation angle is also given. The model is verified with real observation data.

**Key words** GPS; network adjustment; numerical partial derivation; tradition observable; rotation angle

(上接第 272 页)

## JX-4A Digital Photogrammetric System

*Liu Fengde Jia Weiping Qiu Feng Liu Xianlin*

(Chinese Academy of Surveying and Mapping, 16 North Taiping Road, Beijing, China, 100039)

**Abstract** This paper introduces the structures and principles of JX-4A digital photogrammetric system, and gives the details of important techniques and technical specifications. It also proposes the development direction of JX-4A.

**Key words** digital photogrammetric system; design; structure; technical specification