

重力垂直梯度非线性变化研究^{* 1}

陈 钊¹⁾ 李 辉^{1,2)} 邢乐林^{1,2)} 孙少安^{1,2)} 张晓彤¹⁾ 张 品¹⁾

(1)中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉 430071
(2)中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地,武汉 430071)

摘 要 通过理论模拟试算和地面实测结果解算表明:山体边缘的重力垂直梯度在 80 cm 和 130 cm 高度处存在较为明显的空间非线性变化,超过 $0.02 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$;空间非线性变化随高度变化呈增大趋势。因此在分别利用 FG5 与 A10 绝对重力仪建立重力基准时,由不同仪器测量高度引起的归算重力变化不可忽视。

关键词 山体边缘;重力;绝对重力;重力垂直梯度;非线性变化

中图分类号:P312.1

文献标识码:A

STUDY ON NON-LINEAR VARIATION OF VERTICAL GRADIENT OF GRAVITY

Chen Zhao¹⁾, Li Hui^{1,2)}, Xing Lelin^{1,2)}, Sun Shaoan^{1,2)}, Zhang Xiaotong¹⁾ and Zhang Pin¹⁾

(1)Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071
(2)Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA Wuhan 430071)

Abstract The results of simulation and ground measurements show that there is obvious non-linear variation in vertical gradient of gravity from the ground surface to a height of 80 cm and 130 cm, the amount is more than $0.02 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$, and the variation of gradient increscent with the changes of elevation. Therefore, the difference caused by height has to be paid attention in gravity measuring with FG5 and A10 absolute gravimeter

Key words: sidehill; gravity; absolute gravimetry; vertical gradient of gravity; non-linear

1 引言

相对重力联测中需要对绝对重力测量数据进行重力固体潮改正、极移改正、大气压改正、海潮负荷改正和重力垂直梯度归算^[1]。随着模型精度的提高,精密重力垂直梯度的测定在很大程度上决定了地面绝对重力基准的准确度。当前,重力垂直梯度测量精度要求为 $0.03 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2} \times h(\text{cm})$,而不同类型绝对重力仪的有效测量高度不同,如 FG5 约为 130 cm, A10 约为 80 cm,故在绝对重力测定的同步重力垂直测量中,因 FG5 和 A10 绝对重力仪架设高

度不同,由点位环境特别是地形引起的重力垂直梯度测量结果在不同高度可能存在一定差异,即重力垂直梯度的空间非线性变化。因 FG5 和 A10 有效高度相差近 60 cm,在建立地面绝对重力基准时,可能引起 $2.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 的偏差。而目前绝对重力在有效高度处的不确定度可达 $(1 \sim 2) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ^[2,3],为了利用不同类型的绝对重力仪建立高精度地面绝对重力基准,需要研究不同观测场地下重力垂直梯度的空间非线性变化。基于此,本文采用理论模拟和实测数据,研究了重力垂直梯度的空间非线性变化。

* 收稿日期:2013-08-26

基金项目:国家自然科学基金(41204019);中国地震局地震行业科研专项(201308004)

作者简介:陈钊,男,1989年生,硕士,主要从事重力观测技术及应用研究。E-mail:czhao8906@163.com

2 理论模拟计算

2.1 重力垂直梯度计算

假设地面点和有效高度处之间的垂直高差为 Δh , 利用相对重力仪在墩面和有效高度之间进行至少 5 个往返闭合观测, 获得重力段差 Δg , 则 Δh 高度处的重力垂直梯度 g_h 计算公式为^[4]:

$$g_h = \frac{\Delta g}{\Delta h} \tag{1}$$

2.2 理论计算公式

本文将引起重力垂直梯度空间非线性变化的山体近似为长方体模型, 通过调整其参数, 获得不同模型下的重力异常、重力垂直梯度及其变化, 探讨重力垂直梯度的空间非线性理论变化。

如图 1 所示, 取 Z 轴为铅垂向下的方向, X 轴指北, P 点 (x, y, z) 为长方体外任一点, P' 点 $(\varepsilon, \eta, \zeta)$ 为场源点的坐标, 则长方体重力异常正演理论公式为^[5]:

$$\Delta g(x, y, z) = -G\rho \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{\eta_1}^{\eta_2} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \left\{ (\xi - x) \ln [(\eta - y) + r] + (\eta - y) \ln [(\xi - x) + r] - (\zeta - z) \arctan \left[\frac{(\xi - x)(\eta - y)}{(\xi - z)r} \right] \right\} dx dy dz \tag{2}$$

式中, G 为万有引力常数, $\rho = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 为长方体密度, $r = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\xi - z)^2}$ 为 P 点到 P' 点的距离, (ξ_1, ξ_2) 、 (η_1, η_2) 、 (ζ_1, ζ_2) 分别为长方体块在 X 方向、 Y 方向、 Z 方向的范围。

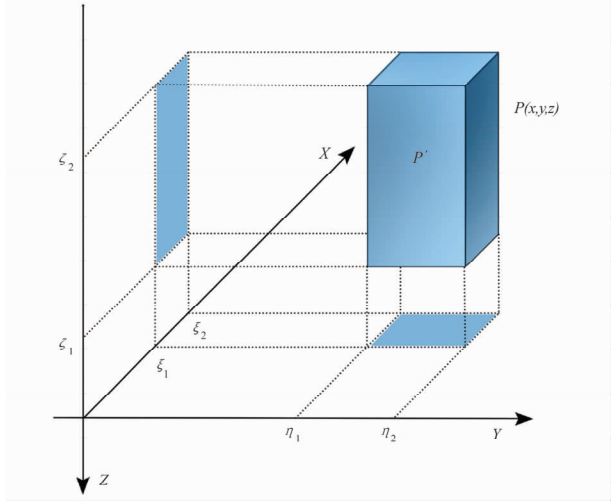


图 1 三维柱体模型
Fig. 1 Model of 3-D prism

2.3 模拟试算

平原地区, 由地形变化引起的重力垂直梯度非线性变化量不大, 可忽略不计, 而绝大多数绝对重力基准点位于点位环境噪声干扰较少的山体边缘, 主

要是位于山坡或山坳处的台站。考虑到重力垂直梯度空间非线性变化的量级较少, 为了突出变化分别以两类不同点位状况先对高差为 560 cm、间隔 20 cm, 再对高差为 130 cm、间隔为 10 cm 的重力垂直梯度进行模拟试算^[6]。

2.3.1 山坡

假设模拟长方体的长、宽、高分别为 1 000、1 000 和 560 m, 中心点位坐标为 (1 000 m, 1 000 m, 280 m), 计算点 P 的平面坐标为 (1 505 m, 1 000 m), 根据式 (1) 与 (2) 计算得到 P 点不同高度处的重力异常及垂直梯度如图 2 所示, 其中 Y 轴 δ_{Vgg} 为不同高度处重力垂直梯度的变化量, 即重力垂直梯度空间非线性变化。

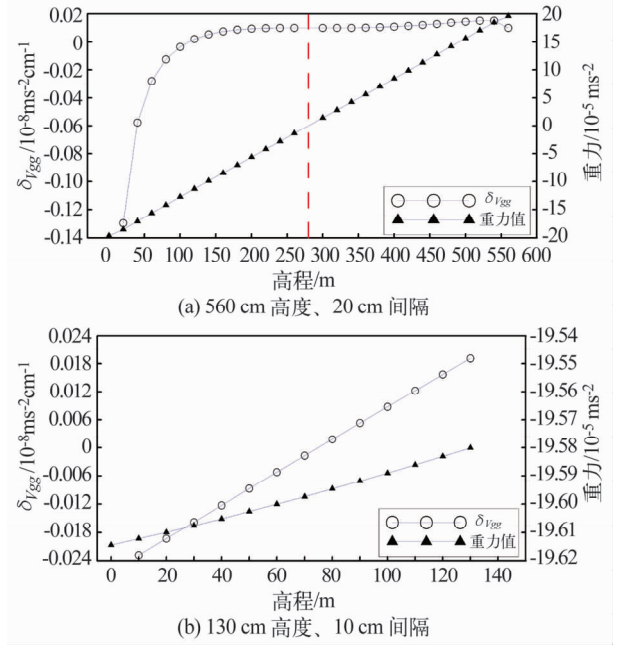


图 2 山坡重力异常及重力垂直梯度空间非线性变化
Fig. 2 Gravity anomaly in hillside and non-linear variation of vertical gradient gravity

由图 2(a) 所示, 重力异常随着高度的增加呈线性增加, 以 280 m 高度处即山体高度一半处为界, 重力异常数值大小相同但符号相反; 重力垂直梯度空间非线性变化即其异常变化随着高度的增加呈总体增加趋势, 但增加趋势逐渐减缓; 其量级变化范围约为 $(-0.14 \sim 0.02) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$, 在 20 和 40 m 高度处的重力垂直梯度变化达 $0.07 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$ 。

由图 2(b) 所示, 重力异常随着高度的增加亦呈线性增加; 重力垂直梯度空间非线性变化随着高度的增加呈近似线性增加; 其量级变化范围约为 $(-0.024 \sim 0.02) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$, 在 80 cm 与 130 cm 处的空间非线性变化可达 $0.02 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$ 。

2.3.2 山坳

假设模拟长方体的长、宽、高分别为 1 000、

1 000和 560 m,两个长方体中心点位坐标分别为 (1 000 m,1 500 m,280 m)、(2 010 m,1 500 m,280 m),计算点 P 的平面坐标为(1 505 m,1 500 m),根据式(1)与(2)计算得 P 点不同高度处的重力异常及垂直梯度如图 3。

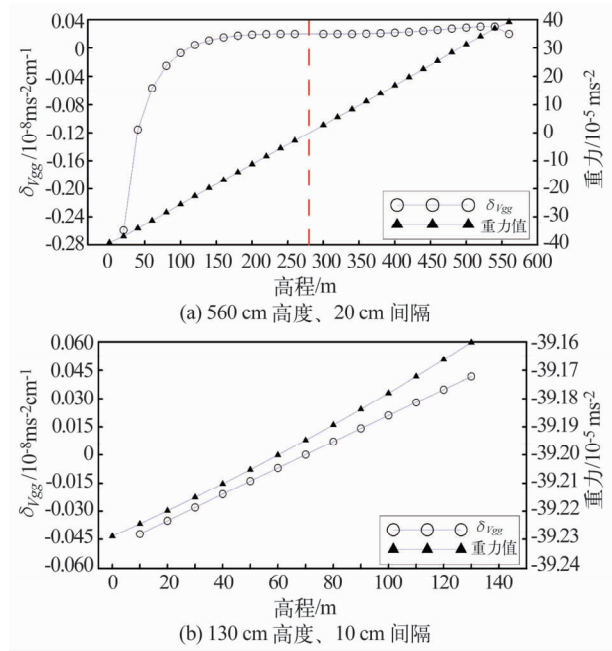


图3 山坳重力异常及重力垂直梯度空间非线性变化
Fig.3 Gravity anomaly in valley and non-linear variation of vertical gradient gravity

由图 3(a)所示,重力异常随着高度的增加呈线性增加,以 280 m 高度处即山体高度一半处为界,重力异常数值大小相同但符号相反;重力垂直梯度空间非线性变化即其异常变化随着高度的增加呈总体增加,但增加趋势逐渐减缓;其量级变化范围约为 $(-0.28 \sim 0.04) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$,在 20 m 和 40 m 高度处的重力垂直梯度变化达 $0.14 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$ 。

由图 3(b)所示,重力异常随着高度的增加亦呈线性增加;重力垂直梯度空间非线性变化随着高度的增加呈近似线性增加;其量级变化范围约为 $(-0.04 \sim 0.04) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$,在 80 cm 与 130 cm 处的空间非线性变化可达 $0.03 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$ 。

对比图 2 和图 3,无论山坡和山坳的模拟试算结果均表明,在 80 cm 与 130 cm 处的重力垂直梯度空间非线性变化较为明显,超过 $0.02 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$,且山坳较山底结果偏大。

目前相对重力仪测量重力垂直梯度的精度通常优于 $0.01 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$,能够探测到量级约为 $0.02 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$ 重力垂直梯度空间非线性变化,因此利用相对重力仪进行重力垂直梯度观测能够满足地震重力测量规范^[7]所规定的重力垂直梯度测量精度不低于 $0.03 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$ 的要求。

3 实测结果分析

3.1 重力垂直梯度测量

为了检验重力垂直梯度空间非线性变化,2013 年 5 ~ 11 月,利用两台 CG-5 型全自动相对重力仪^[8]对多个具有代表性的重力基准点(表 1)在 80 cm 和 130 cm 高度处与墩面之间分别进行 5 个往返闭合联测,以测定重力垂直梯度及其精度,测量过程和数据处理严格按照地震重力测量规范执行。

表 1 点位信息

Tab.1 Information of station points							
点名	场地	经度 (°)	纬度 (°)	点名	场地	经度 (°)	纬度 (°)
椿树垭	山坳	110.5	31.8	庐山 9#	山边	116.0	29.6
庐山 14#	山边	116.0	29.6	庐山 24#	山边	116.0	29.6
武汉 IOS	平原	114.4	30.54	西安 DZ	山边	108.9	34.0
襄樊 DZ	平原	112.0	32.0	武汉 JF	山边	114.3	30.3
沔阳口	山坳	108.8	33.9				

3.2 结果与分析

重力垂直梯度测量完毕后,利用 LADJ 软件对各点位 80 cm 和 130 cm 高度处的重力垂直梯度联测数据进行处理,计算结果汇总见表 2 和图 4。

表 2 重力垂直梯度测量结果及精度 (单位: $10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$)

Tab.2 Results and accuracy of vertical gradient of gravity measurements(unit: $10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$)			
点名	重力垂直梯度及精度		
	0 ~ 130 cm	0 ~ 80 cm	差值
椿树垭	-2.054 ± 0.022	-2.004 ± 0.047	-0.050 ± 0.052
庐山 9#	-3.179 ± 0.004	-3.199 ± 0.012	0.020 ± 0.012
庐山 14#	-4.305 ± 0.004	-4.351 ± 0.008	0.046 ± 0.009
庐山 24#	-3.004 ± 0.009	-3.048 ± 0.009	0.044 ± 0.013
武汉 IOS	-3.085 ± 0.005	-3.085 ± 0.016	0.000 ± 0.017
西安 DZ	-2.359 ± 0.006	-2.397 ± 0.006	0.038 ± 0.009
襄樊 DZ	-3.244 ± 0.016	-3.246 ± 0.006	0.002 ± 0.017
武汉 JF	-2.700 ± 0.005	-2.725 ± 0.008	0.025 ± 0.010
沔阳口	-2.261 ± 0.015	-2.219 ± 0.047	0.036 ± 0.022

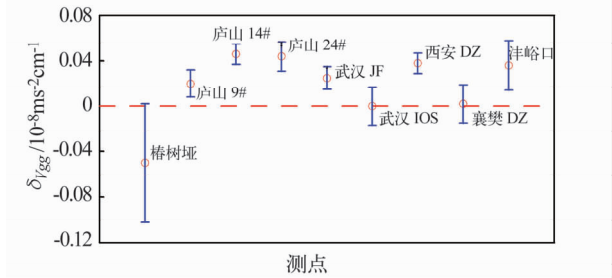


图 4 重力垂直梯度空间非线性变化分布
Fig.4 Distribution of non-linear variation of vertical gradient gravity

由表 2 看出,在所有 9 个测点中,80 ~ 130 cm 高度处的重力垂直梯度空间非线性变化超过 $0.02 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$ 的有椿树垭、庐山 9#、庐山 14#、庐山 24#、武汉 JF、西安 DZ 和西安秦岭沔峪口共 7 个点,且该 7 个点所处的观测场地均为大型山体边缘,分别为神农架、庐山、九峰和秦岭,对空间非线性变化效应显著;武汉 IOS 与襄樊 DZ 测点的空间非线性变化均小于 $0.002 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$,且该两点所处观测场地为地势平坦区域且周围数千米范围内不存在大型山体,几乎不存在空间非线性变化。

由图 4 知,考虑到重力垂直梯度空间非线性变化的精度指标及置信度,武汉 IOS 和襄樊 DZ 两个测点的误差棒范围均通过零值线,不存在空间非线性变化,由于椿树垭观测精度稍差,其误差棒上限恰好通过零值线,可能不存在空间非线性变化;其余 6 个测点的误差棒范围均在零值线上方,表明 80 ~ 130 cm 高度处的重力垂直梯度是增大的,其空间非线性变化随高度呈增加趋势,与图 1(b)和图 2(b)模拟试算结果较为吻合。

在以上存在空间非线性变化的 6 个测点中,若对同一测点均利用 A10 和 FG5 绝对重力仪建立绝对重力基准,因空间非线性变化引起的墩面归算重力值变化可达 $(1.5 \sim 3.5) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。国内外绝对重力仪比对观测结果表明^[9-11],A10 和 FG5 绝对重力仪的偏差小于 $2.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,小于本文实际观测到的空间非线性变化引起的重力变化。考虑到绝对重力仪的不确定度可达 $(1.0 \sim 2.0) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,因此重力垂直梯度空间非线性变化需加以考虑,以建立更加精密的绝对重力基准,更好地为相对重力联测提供起算基准,避免因基准引起的重力网平差结果有所偏差^[12]。

理论模拟试算和实际观测结果均表明,在山体边缘的测点重力垂直梯度随着高度的增加呈增加趋势。

4 结论

1)理论模拟试算和实测重力垂直梯度解算结果均表明,山体边缘的测点在 80 cm 和 130 cm 高度处存在较为明显的空间非线性变化,且随高度增加呈增大趋势,超过 $0.02 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}/\text{cm}$;地势平坦区域几乎不存在明显的空间非线性变化。

2)在利用不同类型的绝对重力仪(FG5 与 A10)建立绝对重力基准时,两种仪器高度差大于 50 cm,因此由重力垂直梯度空间非线性变化引起的归算重力值变化约 $2.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。该影响不可忽略,建议不同类型的绝对重力仪在其有效测量高度处架设重力垂直梯度观测平台,以减少空间非线性变化引起的绝对重力值偏差。

参 考 文 献

1 邢乐林,等.成都基准台绝对重力复测结果分析[J].大地测量与地球动力学,2008(6):38-42. (Xing Lelin, et al. Analysis of repeat absolute gravity surveying results at Chengdu earthquake station[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2008(6):38-42)

2 王勇,张为民. FG5 绝对重力仪[J]. 地壳形变与地震,1996(2):94-97 (Wang Yong and Zhang Weimin. FG5 absolute gravimeter[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1996(2):94-97)

3 Schmerge D and Francis O. Set st + andard deviation, repeat-ability and offset of absolute gravimeter A10 - 008 [J]. Metrologia,2006,43:414-418.

4 王宝仁,徐公达. 高精度重力测量[M]. 北京:地质出版社,1995. (Wang Baoren and Xu Gongda. High precision gravity measurement [M]. Beijing: Geological Publishing House,1995)

5 骆遥. 两种新的长方体重力场正演表达式及其理论推导[J]. 工程地球物理学报,2008,5(2):210-214. (Luo Yao. New expressions for gravitational attraction of a homogeneous rectangular prism and its deduction[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2008,5(2):210-214)

6 郭良辉,等. 重力和重力梯度数据三维相关成像[J]. 地球物理学报,2009,52(4):1 098-1 106. (Guo Lianghui, et al. 3-D correlation imaging for gravity and gravity gradiometry data[J]. Chinese Journal of Geophysics,2009,52(4):1 098-1 106)

7 国家地震局. 地震重力测量规范[S]. 北京:地震出版社,1997. (Group of Gravity Survey Standards Enactment, SSB. Standards for Seismic Gravity Survey[S]. Beijing:Seismological Press,1997)

8 邢乐林,等. CG-5 重力仪零漂特征研究[J]. 地震学报,2010,32(3):369-373. (Xing Lelin, et al. Study on zero drift characteristics of CG-5 gravimeter[J]. Acta Seismologica Sinica,2010,32(3):369-373)

9 邢乐林,等. 欧洲 Walferdange 绝对重力仪比对观测[J]. 大地测量与地球动力学,2009(3):77-79. (Xing Lelin, et al. Comparative observation of absolute gravimeters in Walferdange [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009 (3):77-79)

10 Olivier F, et al. Results of the European comparison of absolute gravimeters in Walferdange (Luxembourg) of November 2007[C]. Gravity, Geoid and Earth Observation,2010.

11 Schmerge D, et al. Results of the first north American comparison of absolute gravimeters, NACAG-2010 [J]. Journal of Geodesy,2012,86:591-596.

12 孙少安,康开轩,黄邦武. 关于区域重力场变化基准的思考[J]. 大地测量与地球动力学,2012(1):17-20. (Sun Shaoan, Kang Kaixuan and Huang Bangwu. Thinking on datum of regional gravity field variation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamic,2012(1):17-20)