

用 FG5 绝对重力仪检测青藏高原拉萨点的隆升

张为民 王 勇 许厚泽 张赤军 郝兴华 刘 明

(中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077. Email: igg.zhwm@sohu.com)

摘要 用观测精度高达 $2\times10^{-8}\text{ m/s}^2$ (μGal) 的 FG5 绝对重力仪监测了青藏高原的隆起. 1999 年与 1993 年拉萨点的重力观测结果分析表明: 6 年中重力值减小了 $12\times10^{-8}\text{ m/s}^2$, 证实拉萨在隆升, 且上升速率为 10 mm/a .

关键词 绝对重力 青藏高原 拉萨 隆升

重力测量是研究青藏高原隆起的重要手段之一, 中国科学院测量与地球物理研究所 1982~1996 年期间曾用 LaCoste-G 型相对重力仪在成都-拉萨间做了多次重复的相对重力测量, 这一方法虽然比较费时费力, 精度又受到限制, 但也从中发现拉萨相对于成都在不断地隆起^[1].

与相对重力测量及形变测量相比, 高精度绝对重力测量具有以下两方面的优势或特色, 一方面它既能反映地面上某点的地壳垂直形变, 又能提供该点下方物质运动信息; 另一方面, 它测量的是地表相对地心的垂直变化, 这垂直基准中有其绝对和独立的意义^[2].

为监测喜马拉雅山脉的上升, 1991~1992 年美国与尼泊尔合作用绝对重力仪和全球定位系统(GPS)在加德满都进行了测量, 其中绝对重力测量的误差达 $\pm 6.7\times10^{-8}\text{ m/s}^2$ [3, 4]. 精度不高的主要原因在于先进的 FG5 型绝对重力仪尚未问世, 当时采用的是尚未得到改进的 JILA 型仪器.

1 FG5 绝对重力仪的实际观测精度

在 FG5 绝对重力仪问世以前的绝对重力仪(包括 JILA 型)中, 由于一些仪器受到地面反弹和倾斜的影响, 以及测量激光波长存在误差等原因, 致使绝对重力测量的精度受到影响. 因此, 后来在 FG5 绝对重力仪的设计中做了重要改进^[5]: 一是采用了高稳定度的碘频 He-Ne 激光器, 它是目前国际计量标准长度米的绝对光学频率标准, 其绝对精度达 $2.5\times10^{-11}\text{ km}$, 等价于 $2\times10^{-9}\text{ m/s}^2$ ($0.2\text{ }\mu\text{Gal}$), 目前较好的碘稳频激光器的稳定度为 $10^{-9}\sim10^{-10}\text{ d}^{-1}$; 二是采用了在线式干涉测量系统, 它可使真空室内的自由落体测试质量块与悬挂在超长弹簧内的参考质量块保持在一条直线上, 从而消除干涉仪基座倾斜对测量结果的影响. 此外, 经过上述改进后的 FG5 绝对重力仪与 JILA 型相比, 具有重量轻、体积小、耐振动等优点, 观测精度也比 JILA 型要高数倍, 这一精度更是相对重力仪所不能及. 在减小环境温度的变化、削弱磁场静电、仪器垂直度、真空度、质量块旋转、科氏效应、电子相位漂移、地面反弹与倾斜、辐射压力等影响的情况下, 该仪器的观测精度一般不低于 $2\times10^{-8}\text{ m/s}^2$ [6, 7].

1996 年中国科学院测量与地球物理研究所使用 FG5/112 仪器在 15 个点上进行观测^[8], 其标准偏差如表 1 所示.

表 1 FG5/112 绝对重力仪在 15 个观测点上的测量标准偏差值($\times10^{-8}$, 单位: m/s^2)

测点	武汉 IGG	武汉 WTUSM	武汉 IOS	宜昌	恩施	郧县	姑咱	西昌	攀枝花	丽江	洱源	下关	楚雄	昆明	南宁
标准偏差	1.75	2.36	2.33	0.83	0.81	1.44	1.10	2.44	1.62	1.76	1.16	1.98	2.64	1.89	2.78

在以上 15 个测点上的观测标准偏差中, 最小的为 $0.81 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 最大的为 $2.78 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 它们中的大多数均在 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 以下, 少数超过该值者, 均由于测点不在地下室或受到周围振动影响所致. 因此, 在稳定的测站和较小干扰的情况下, FG5 绝对重力仪的观测精度可以达到 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$. 此外, 许多研究表明: 构造活动地区的重力变化均会超过上述数值, 且已为重力仪的监测所证实.

从上述分析和介绍可知: (1) 依 FG5 绝对重力仪的精度而言, 它有可能检测出大于 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的重力变化; (2) 数年后的局部性乃至区域性的重力场变化, 特别是在地壳运动和地震活动剧烈地区的变化, 会比 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 大得多. 因此, 用 FG5 绝对重力仪能够检测出上述重力场非潮汐变化, 也能够检测出 5~10 mm 地壳垂直形变^[2].

2 拉萨点上绝对重力测量结果及误差分析(以 FG5/112 为主)

在拉萨点上, 我们根据 FG5/112 绝对重力仪的测试结果、测点的噪声水平、对观测结果的精度要求, 结合有关国际标准, 采用了如下观测方法: 设置观测组数为 48 或 24 组, 每组观测的落体次数一般为 100~150 次, 单次落体的标准偏差小于 $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$ 时的落体次数为 100 次, 大于 $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$ 时的落体次数为 150 次. 单次落体测量时间设置为 10 s, 每组观测所需时间约为 15 min, 每组的观测起始时间设置为整点或整半点时刻, 整个 48 或 24 组的观测均匀分布在 24 h 之内. 这一观测方案有利于消除固体潮、海潮、大气压等影响. 为了减少振动干扰对观测结果的影响, 观测一般安排在夜晚进行. 最后按惯用公式进行了标准偏差的计算, 得到此次拉萨绝对重力点的观测结果, 详见图 1 及表 2.

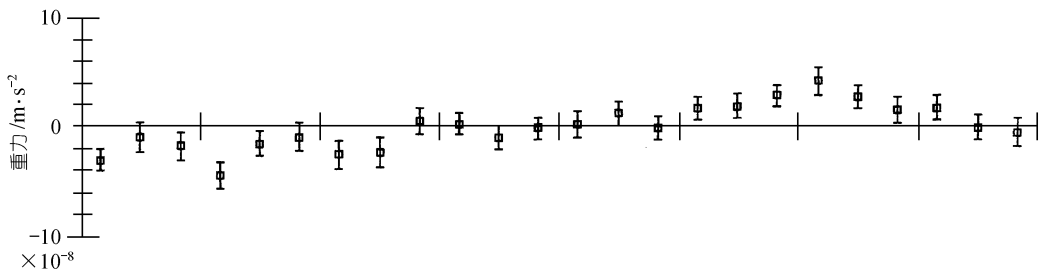


图 1 FG5/112 1999 年 9 月在拉萨点实际观测数据误差分布
横坐标表示以儒略日为单位的时间, 每个刻度为 1 h

表 2 拉萨点 FG5/112 观测结果

观测时间	仪器型号	仪器有效高度/cm	仪器有效高度处结果/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	单次落体标准偏差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	观测结果标准偏差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	归算到地面重力值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
1999 年 9 月	FG5/112	131.7	9.781 028 92	10.8×10^{-8}	2.04×10^{-8}	9.781 032 54

在 FG5 问世的当年, FG5/101 即与 FG5/102, FG5/103 等 7 台仪器在同一点上进行了比较, 它们的标准偏差只有 $1.1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$. 1996 年初 FG5/112 在 WTUSM 点上的观测与 1993 年经系统差改正后 FG5/101 观测的结果也很接近. 因此, 可以认为, 1993 年 FG5/101 绝对重力仪的观测精度与 1999 年 FG5/112 观测精度相同, 在消除系统差后的观测误差可视为随机误差(m_0), 这时由两次绝对重力观测结果引起的标准偏差为 $m = \sqrt{2}m_0 = \sqrt{2} \times 2.04 = \pm 2.88 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$.

在 FG5 的数据处理中, 经过潮汐等项改正后的重力值是在落体质量顶部位置(1.3 m 附近)的结果, 但当相对重力测量起始点都设在地面上时, 需将上述的重力值转换到地面设有标志的重力点上, 或者为了使之与其他类型绝对重力仪的观测值作比较, 需将重力值转换到特定的高度如 0.8 或 1 m 处, 为完成此项重力转换, 需在实测点上测量重力垂直梯度. 工作中, 我们用两台 LaCoste-Romberg 相对重力仪 G-584 和 G-589, 测量从地面至 1.3 m 处的重力垂直梯度, 采用的是四程测量方法, 在拉萨两台仪器的结果为 $-2\,749 \pm 6.7\text{ E}$.

一般在地下室内重力梯度变化很小, 为了消除因梯度测量不精确引起归算到地面的误差, 应尽可能让 FG5 型绝对重力仪观测的重力值不作梯度改正, 理想的方法是用在同一高度上(1.30 m)两台仪器的结果进行比较, 因为 FG5 绝对重力仪的设计高度为 1.30 m, 即使两台仪器有效高度相差 10 cm, 如梯度的误差为 $\pm 10\text{ E}$, 则高度归算的误差也仅为 $1 \times 10^{-9}\text{ m/s}^2$, 此时误差可以忽略.

3 拉萨的重力减小与隆升

一般, 因地面升高引起重力减小有以下几种模式:

(1) 纯粹是一点在空间的上升. 假定该点与邻近的地壳物质无任何联系, 例如在仪器架上的升降, 这时可用自由空气垂直梯度来估算, 即每上升 1 cm 重力减小 $3.1 \times 10^{-8}\text{ m/s}^2$, 这一般与实际不太符合.

(2) 设测点与周围地表物质同时上升. 只要区域的半径远远大于上升的高度, 这时可用 Bouguer 梯度来估算, 即重力变化(Δg)与高程变化($\Delta h(\text{m})$)有如下关系:

$$\Delta g = (-3\,086 + 2\delta Gd)\Delta h = -1\,967\Delta h,$$

式中 G 为引力常数, d 为地壳密度, 取值为 $2\,670\text{ kg/m}^3$, 在时间较短的尺度上可以这样处理.

(3) 顾及地壳的黏弹性^[9]. 这时膨胀源引起的隆升高度和重力变化为时间的函数, 并以 $\Delta h(t)$ 和 $\Delta g(t)$ 表示, 且

$$\Delta h(t) = \frac{V}{2\delta} \left[\frac{mt}{K} (1 - \exp(at) + t) \right] \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}},$$

$$\Delta g(t) = \frac{V}{2\delta} \left[\frac{mgt}{K} (1 - \exp(at) + 2\delta Gr't) \right] \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}},$$

式中 $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$, m 为剪切模量, K 为体积弹性模量, D 为场源深度, r' 为膨胀体内异常质量的密度, V 是长期膨胀的平均速度, g 为自由空气重力垂直梯度, t 为松弛时间, $a = -3K/(3K + m)$. 由上两式便可以计算出不同时刻地表垂直位移和重力变化, 不过这在长期的观测中需要顾及.

拉萨绝对重力点设在西藏自治区测绘局人工防空山洞内, 地基稳定, 温度变化较小, 故适宜于 FG5 的重力观测. 此外, 这次 FG5/112 观测和 1993 年中德合作的 FG5/101 观测^[10]都是在当年 9 月进行的, 如此可消除季节变化对重力的影响, 以提高检测精度. 现对两者作一对比, 详见表 3.

表 3 拉萨点上的两次绝对重力观测结果的对比

观测时间	仪器型号及所属国家	归算到地面重力值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	FG5/112 与 FG5/101 观测结果之差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
1993 年 9 月	FG5/101, 德国	9.781 032 66	12×10^{-8}
1999 年 9 月	FG5/112, 中国	9.781 032 54	

通过以上分析和对比可知, FG5 的观测误差一般不大于 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 在 6 年中拉萨点减小了 $12 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的重力信号是能够通过该仪器检测出来的, 重力值的减小说明拉萨点在上升.

为了推求拉萨点的上升速率, 我们采用上述的第 2 种模式进行计算, 这时 Δg 与 Δh 之比为 -1.967 E , 如此很易算得拉萨点每年的上升量为 10 mm , 这与重复水准测量的结果^[11]基本一致.

4 结语

青藏高原是当今世界上构造运动最为剧烈的地区之一, 无论板块碰撞或是俯冲等在地壳深部发生的地质事件, 势必在地表上有所反映. 水准测量以及前几年 GPS 重复测量^[12]的形变手段, 已检测出青藏高原及喜马拉雅山一带的隆升. 根据本文对 FG5 绝对重力仪的精度分析与拉萨点两期资料的对比分析, 可以推得 6 年来该点以平均每年 10 mm 的速率上升. 这提供了检测地壳垂直形变的另一种手段——重复绝对重力测量, 而这种方法具有经济、快速、无误差积累等特点. 如果在同一点上既作物理的绝对重力测量又作几何的形变测量, 则将有助于地壳运动及其动力机制的研究.

致谢 在绝对重力测量期间得到了西藏自治区测绘局等单位 and 马小平、刘大江等的帮助, 在此表示诚挚的谢意. 本工作为国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”、国家攀登计划“现代地壳运动与地球动力学”的二级课题“中国地区重力场与大地水准面的研究”和中国科学院重点 (KZ952-JI-417) 资助项目.

参 考 文 献

1 许厚泽, 蒋福珍, 张赤军. 重力变化与青藏高原隆起. 见: 祝贺方俊院士 90 寿辰文集. 北京: 地震出版社, 1994. 28~34

2 王 勇, 张为民. 高精度绝对重力测量在地壳垂直运动研究中的作用和应用前景. 地壳形变与地震, 1997, 17(3): 98~102

3 Bilham R. Gravity and the Geoid in the Nepal Himalaya. N92-14560 (Colorado Univ), 1992. 1~2

4 Jackson M E, Bilham R. 1991-1992 GPS Measurements across the Nepal Himalaya. Geophys Res Lett, 1994, 21(12): 1169~1172

5 Sasagawa G, Klopping F J, Niebauer T M, et al. Instrument validation studies of the FG5 absolute gravity meter. EOS Trans AGU, 1993, (74): 103

6 王 勇, 张为民. FG5 绝对重力仪. 地壳形变与地震, 1996, 16(2): 94~98

7 Neibauer T M, Klopping F J, Faller J E. The FG5 absolute gravimeter. Bur Grav Int Bull d' Inf Toulouse, 1995, (11): 1~2

8 王 勇, 许厚泽, 张为民, 等. 1996 年中国中西部地区高精度绝对重力观测结果. 地球物理学报, 1998, 41(6): 818~826

9 王 勇. 粘弹性斗空间内膨胀引起的地表垂直位移和重力变化. 地壳形变, 1996, 16(2): 8~11

10 陈益惠, 黄大伦, 丘其宪. 我国绝对重力观测结果和重力测量精度. 地球物理进展, 1996, 11(3): 21~39

11 马杏桓主编. 地球动力学图集. 北京: 地震出版社, 1989. 18

12 张赤军, 许厚泽, 王 勇. 大地测量在研究青藏地壳运动及其机制中的作用. 地球科学进展, 1998, 3(5): 504~508

(2000-02-24 收稿, 2000-06-30 收修改稿)