

研究简报

拉科斯特重力仪的格值标定

华昌才 果勇

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

江志恒

(中国北京 100039 国家测绘局测绘研究所)

LCR 重力仪是测量精度比较高的重力仪,其读数精度是 100nm/s^2 . 但由于零漂比较小,每小时约 $20\text{--}30\text{nm/s}^2$, 故在二点之间测单程或单次一般可达 $100\text{--}200\text{nm/s}^2$ 的测量精度。显然,如果测量条件及环境恶劣,二点之间的距离很长或二点之间的测量时间间隔太长,则测量精度较差。

拉科斯特重力仪虽有较好的测量精度,但随着人类对地球奥秘认识的深入,对重力测量精度的要求也随之提高;尤其是在地震预报预测方面,由于地壳运动,物质分布的变异导致重力的变化,其量级很小。要检测这些变化,自然希望测量精度达到几个 $10^{-2}\mu\text{m/s}^2$,甚至 1 个 $10^{-2}\mu\text{m/s}^2$ 。这就需要考虑进一步提高施测精度的方法和措施。

我们知道,拉科斯特重力仪是在室内进行标定的,即利用克劳特夫特·简尔装置进行分段标定。仪器的全测程是 $70000\mu\text{m/s}^2$, 把它划分为几十个 $2000\mu\text{m/s}^2$ 的小测程,求出各个分段的相对比例因子,此为室内标定。然后在一个 $2000\mu\text{m/s}^2$ 野外基线场上进行实测定,最后由此根据相对比例因子求出各个 $2000\mu\text{m/s}^2$ 范围的标定值,这就是所谓的厂方格值函数。

显然,可推断仪器在野外的实际标定精度大约是 100nm/s^2 (在 $2000\mu\text{m/s}^2$ 段), 相对精度约为 10^{-4} (有人认为是 10^{-3})。这可能由于相对比例因子带进了仪器的系统误差或其它影响。进一步可推断在大于 $2000\mu\text{m/s}^2$ 的测段上就会有几千 nm/s^2 的系统误差。在小于 $2000\mu\text{m/s}^2$ 的测段上,考虑到传动杆或减速齿轮的误差,将会有周期误差的影响。因此,要提高重力差很大的测段的重力测量精度,就必须在长基线上进行精确标定,从而修定厂方给定的格值表,以降低各台仪器的系统误差,至少可使测量精度(实际精度)提高一个量级。对于比较小的段差,我们又需要在 $10\mu\text{m/s}^2$, $100\mu\text{m/s}^2$ 等一系列间隔的短基线上对仪器进行标定,以确定出传动杆及齿轮引起的周期误差,这就有可能使仪器的测量精度达到 10nm/s^2 级的水平。下面我们讨论在长短基线及高楼垂直基线上的测量,并给出仪器的格值表或格值函数的修正。

1988年6月28日收到本文初稿,1989年3月18日决定采用。

一、测量概况

1983年我们有三台仪器(No.147,570,596)参加全国基准重力网的建立,一方面为建立国家基准重力做了部分工作,同时又标定了三台仪器的线性修正项。测前,首先统一制定了测量规范,采用零位读数,往返重复测量方法。网内有六个绝对点:北京、广州、青岛、福州、南宁及昆明(见图1)。各大城市之间利用民航客机作为运输工具,飞机平稳,振动小。地面联测使用小汽车,整个作业过程尽量降低振动干扰。由于仅参加了部分作业,所以实际作业量是No.147测量了38段, No.570测量了50段, No.596测量了48段, 联测中误差的平均值为 80nm/s^2 , 通过网外检验可达到的实际精度为 $200\text{--}300\text{nm/s}^2$ 。

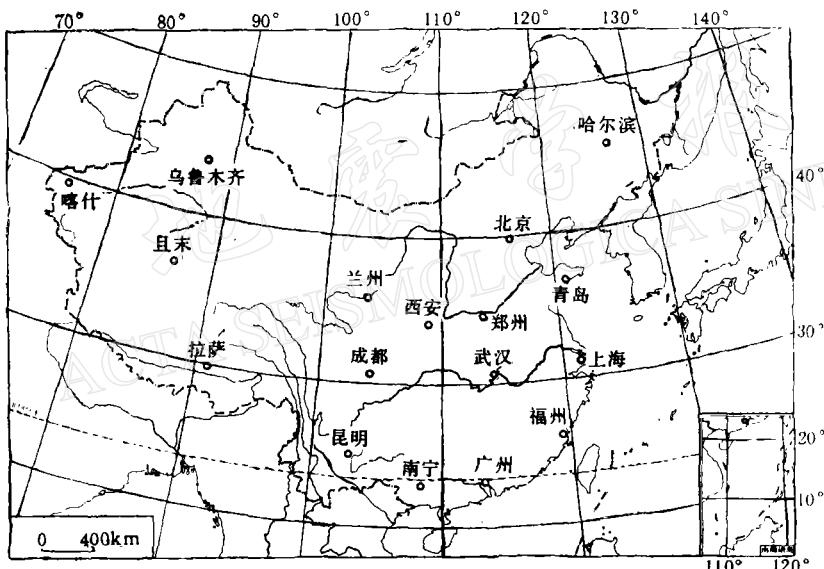


图1 1983年航测点分布图

1986年又与地震研究所合作研究仪器的周期误差。分别在北京—广州长基线(含北京、武汉、广州三个绝对点)及庐山基线场与武汉外贸大楼的短基线上进行了测量。

在京—广线上,三台仪器做了二个往返,在京—武,武—广线各做了一个往返。庐山基线在1985年由中、日合作进行测量并已有论文发表。庐山基线共有24个测点,重力差约为 $2322\mu\text{m/s}^2$, 相邻测点间的重力差平均约为 $100\mu\text{m/s}^2$, 行程约为10分钟。但个别点位欠稳,人站立时对读数有影响。

外贸大楼所进行的垂直基线测量研究,1986年中德合作曾有结果提供。该楼高68m,共21层,总重力差为 $202\mu\text{m/s}^2$, 平均段差为 $10\mu\text{m/s}^2$ 的测点有19个。

楼内重力测量基本上是手提仪器上下楼层测量。由于种种原因使楼内电梯无法使用,测量时正是楼内施工,有钻孔的,有抡大锤的,使楼板振动极大,测量条件极为恶劣,读

数精度约在 $\pm 200\text{--}300 \text{nm/s}^2$, 甚至更大, 基本上是操作员根据经验估读, 但采用多次重复测量, 每二点间进行了 10 个单程测量, 使得测量精度有所提高。

二、观测数据的处理及结果

1. 首先根据厂方给定的格值表换算出重力值, 然后进行固体潮理论值改正。潮汐因子用北京、武汉及广州的观测结果, 庐山地区使用武汉的潮汐因子。潮汐值的精度为 10nm/s^2 。

2. 气压改正。通常气压改正是考虑大气层高度变化的引力效应, 改正公式如下:

$$\Delta g = 0.4(p_n - p_0)$$

式中 Δg 单位是 10nm/s^2 , p_n 为测点气压读数, p_0 为测量站标准气压, 它可以由测点高程计算

$$p_0 = 1013.25(1 - 0.0065h \div 2.88)^{5.255}$$

式中 h 为测点的海拔高程, 以 m 为单位, 气压以毫巴为单位。如用毫米汞柱表示气压则两者的换算为:

$$1 \text{毫巴} = 760/1013.25 = 0.75006 \text{ (毫米汞柱高)}$$

3. 仪器高改正。仪器观测时是放在底盘上的, 有一定高度, 其值为 20cm。正常重力梯度为 $-0.3086 \times 10^{-5} \text{s}^{-2}$, 我们即以此为改正, 并计算单点重力值。使用此理论梯度值, 改正值不超过 30nm/s^2 。

4. 漂移改正。通常我们取往返二程的值作平均, 做为初步的段差。由于仪器零漂很小, 故不再作进一步改正。特别是对于大段差的标定无甚影响。

三、平差计算及结果

数学模型。各仪器的读数经各项改正后求得段差值, 并以此组成观测方程, 按间接观测平差原理进行平差计算。LCR 重力仪器的期望周期见表 1。

表 1 仪器期望周期值(单位: $10 \mu\text{m/s}^2$)

仪器号	周 期 序 号						
	1	2	3	4	5	6	7
$N < 485$	1206	603	70.94	35.47	7.87	3.94	1.00
$N > 485$	220	110	73.33	36.67	7.33	3.67	1.00

通常情况下 LCR 重力仪的观测值可用下式表示:

$$F(Z_i) = F_0(Z_i) + \sum_{k=1}^n \tilde{Z}_i E_k + \sum_{n=1}^p A_n \cos(W_n Z_i - \Phi_n) \quad (1)$$

方程(1)由多项式和富里叶级数组成, 多项式反映了 LCR 重力仪的双重摆杆减速系统的非线性, 而富里叶级数则模拟了刻度误差以及螺杆和齿轮方面的偏心。

式中： Z_i 为 i 点重力仪的读数；
 F_0 为厂方标定表值；
 \tilde{Z}_i 为根据 F_0 标定改正后的重力数；
 E_k 为多项式系数；
 n 为周期项序号；
 A_n 为第 n 项周期的振幅；
 $W_n = 2/T_n$ 为第 n 项周期的频率；
 Φ_n 为第 n 项周期的位相；
 T_n 为第 n 项的周期。

若以重力段差为观测量，则观测方程为

$$\begin{aligned} \Delta g_{ii} + v_{ii} &= \bar{g}_i - \tilde{g}_i - E_1(\tilde{Z}_i - \tilde{Z}_i) - E_2(\tilde{Z}_i^2 - \tilde{Z}_i^2) \\ &+ \sum_{n=1}^p x_n \left(\cos \frac{Z_i 2\pi}{T_n} - \cos \frac{Z_i 2\pi}{T_n} \right) \\ &+ \sum_{n=1}^p y_n \left(\sin \frac{\tilde{Z}_i 2\pi}{T_n} - \sin \frac{Z_i 2\pi}{T_n} \right) + D - \Delta t_{ii} \end{aligned} \quad (2)$$

$$x_n = A_n \cos \Phi_n \quad y_n = A_n \sin \Phi_n$$

n 项周期的振幅和相位为：

$$A_n = (x_n^2 + y_n^2)^{1/2} \quad \tan \Phi_n = y_n / x_n$$

Δg_{ii} 为已经各项改正，由厂方格值换算的重力差。

v_{ii} 为 Δg_{ii} 的残差；
 E_1, E_2 各为线性项及二次项的标定值；
 D 为线性零漂率；
 Δt_{ii} 为二点间的观测时间间隔。

绝对重力点的观测方程如下：

$$l_i + v_i = \bar{g}_i$$

l_i 为已知的绝对点重力值。

我们试用二个计算程序（测绘总局计算全国基准重力网的程序 GNAJ 及西德 Toige 的程序）。在具体的计算方案上两者有所不同。表 2 为 1983 年全国重力基准网的标定结果。

表 2 1983 年全国重力基准网标定结果 (GNAJ 程序)

仪器号	147	570	596
线性因子	$1.000345 \pm 6 \times 10^{-6}$	$1.000453 \pm 6 \times 10^{-6}$	$1.000573 \pm 6 \times 10^{-6}$

表 3、表 4 为应用 GNAJ 程序，把日本中川一郎公布的庐山测量成果合并后计算所得结果。

表 3 1986 年标定结果 (GNAJ 程序)

仪器号	147	570	596
线性因子	$1.000317 \pm 7 \times 10^{-6}$	$1.000353 \pm 9 \times 10^{-6}$	$1.000568 \pm 7 \times 10^{-6}$

表 4 周期误差 (GNAJ 程序)

仪器号	周 期	振幅 (nm/s ²)	相位(°)
147	1.00	3.2 ± 1.3	146.6 ± 26
147	3.74	4.4 ± 1.2	16.3 ± 15.3
147	7.89	2.8 ± 1.5	-50.1 ± 30.9
147	35.47	5.9 ± 1.5	-169.4 ± 16.8
147	70.74	9.3 ± 2.1	131.3 ± 13.2
570	1.00	2.6 ± 1.3	54.0 ± 29.3
570	3.67	3.2 ± 1.1	-136.8 ± 18.7
570	7.33	4.2 ± 1.2	143.7 ± 17.4
570	36.67	4.9 ± 1.5	136.3 ± 17.7
570	73.33	7.0 ± 2.1	-163.2 ± 16.9
596	1.00	2.4 ± 1.2	
596	3.67	5.4 ± 1.0	
596	7.33	4.9 ± 1.2	
596	36.67	7.1 ± 1.5	
596	73.33	8.6 ± 2.0	

表 5 线性修正项 (Toije 程序)

仪 器 号	线 性 因 子
147	$1.000318 \pm 7 \times 10^{-6}$
570	$1.000344 \pm 7 \times 10^{-6}$
596	$1.000575 \pm 7 \times 10^{-6}$

表 6 周期误差 (Toije 程序)

仪器号	周期	振幅 (nm/s ²)	中误差	相位 (°)	中误差
147	1.00	0.36	0.81	250.6	134.5
147	7.88	1.24	1.08	115.1	49.4
147	35.47	13.43	4.31	359.1	10.6
147	70.94	9.93	8.83	348.3	39.8
570	1.00	0.83	0.89	233.2	65.0
570	7.33	1.38	0.90	23.4	43.2
570	36.67	7.75	4.20	34.0	25.9
570	73.33	13.12	8.96	339.8	33.3
596	1.00	0.51	0.92	122.0	106.3
596	7.33	3.09	0.90	0.6	18.2
596	36.67	7.24	4.37	264.5	19.9
596	73.33	9.95	9.13	300.5	46.1

武汉研究所根据 Toige 程序改编的程序,其计算结果见表 5。表 5 为不考虑周期误差,直接求解线性项改正函数。表 6 为用三台仪器的观测资料进行平差计算求得的结果。

四、结语

比较上列各表,我们可得出如下几点认识:

1. 1986 年的标定值不同于 1983 年,有二台仪器 (No. 570, No. 147) 的标定值降低约万分之几, No. 596 几乎不变。这是仪器本身的问题还是标定不够精确,还需进一步研究;
2. 若仅用三台仪器在未知基线上求解及标定则结果不好(见表 6),因而必须至少有 6 台以上仪器,在未知基线上进行标定及求解可望有较好的结果。表 4 为加上中川一郎的数据结果;
3. 在同一期测量中,用不同的计算程序求解线性因子,其结果基本相同,中误差都是 10^{-6} ,且求取平均以后的残余零漂无须改正;
4. 试用不同的程序及不同的期望周期,则求得的结果有所不同。这也是有待进一步研究的问题。

本研究工作得到邹其嘉、刘克人同志的大力支持,并得到国家地震局地震研究所的帮助,在此深表谢意。

CALIBRATION OF THE LACOSTE-ROMBERG GRAVIMETER

Changcai Hua and Yong Guo

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing 100081, China)

Zhiheng Jiang

(Institute of Geodesy State Surveying and Mapping Bureau, Beijing 100039, China)