

文章编号: 0253-3782(2001)06-0651-08

GWR 超导重力仪潮汐观测标定 因子的精密测定^{*}

孙和平 陈晓东 许厚泽 王 勇

(中国武汉 430077 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学开放实验室)

摘要 超导重力仪被普遍认为是迄今为止观测精度高、连续性和稳定性最好的相对重力仪,但是在获得真实重力场变化之前,必须利用格值(标定因子)对这类仪器的直接输出量(电压变化)进行标定。研究表明,格值的准确度将影响到观测数据的后续分析和资料的解释,本文利用两期(每期 3 天)FG5 绝对重力仪在武汉国际重力潮汐基准站上的同址测量资料和该台站已知潮汐参数,详细研究了超导重力仪标定因子及其精度。

关键词 超导重力仪 绝对重力仪 潮汐观测 标定因子 精度分析

中图分类号: P312.4 文献标识码: A

引言

超导重力仪以其精度高、连续性和稳定性好的特点已被世界上许多国家应用于观测重力场的时间和空间变化,国际地球动力学合作项目(GGP)的实施,就是利用全球超导重力仪观测网络获得的重力场时间变化研究地球物理学和地球动力学中的国际热点问题(孙和平,许厚泽,1997)。由超导重力仪数据采集系统提供的重力场随时间变化原始数据是以电压变化形式给出的,为了对它们进行后续分析,需对其进行格值标定,因此,获得高精度格值(又称标定因子)是一项十分重要的基础性研究工作(孙和平等,1998)。标定因子的不确定性和误差太大将使观测潮汐参数偏离地球模型值,对观测资料的解释和地球动力学研究应用带来困难(孙和平等,1999;徐建桥等,1999)。近年来随着高精度绝对重力仪的广泛应用,利用绝对重力仪精密测定重力场的潮汐变化已成为可能,因此,只要在同一台站加密绝对重力测量的自由落体数和延长观测时间就可利用绝对重力仪观测研究超导重力仪观测的标定因子。法国 Strasbourg 地球科学研究中心 Hinderer 等利用 24 小时的绝对重力仪观测,获得了精度为 0.72% 超导重力仪标定因子(Hinderer *et al.*, 1991);比利时皇家天文台 Francis 进行了长达 47 天的绝对和超导重力仪同址观测,系统研究了超导重力仪观测的格值问题,获得了精度为 0.10% 标定格值结果(Francis, 1997)。

武汉超导重力仪观测始于 1985 年 8 月,这是我国也是亚洲大陆地区唯一的一台超导

* 国家杰出科学青年基金(49925411)、国家自然科学基金(49774223)和中国科学院知识创新项目(KZ952-J1-411, KZCX2-106)联合资助。

2001-04-02 收到初稿, 2001-09-05 收到修改稿并决定采用。

型重力仪, 目前该仪器承担着国际地球动力学合作项目和中国地壳运动观测网络武汉基准站的重力潮汐变化观测任务, 是我国国际 GGP 计划的唯一参加者(孙和平, 许厚泽, 1997; Hsu *et al.*, 2000). 该仪器刚开始时安装在武汉市距东湖 1.5 km 的中国科学院测量与地球物理研究所办公大楼一层的重力实验室内。根据武汉重力潮汐基准站中英合作期间两台高精度拉科斯特-龙贝格(LCR)潮汐型重力仪(ET15 和 21)1985~1987 年观测资料分析结果, 采用主要潮汐波振幅因子加权求和的方法测定了超导重力仪标定因子(Hsu *et al.*, 1989), 即记录格值, 其值为 $-28.575 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \cdot \text{V}^{-1}$ 。由于仪器老化因素, 该仪器于 1996 年被送到 GWR 仪器厂家进行升级更新, 同时考虑到该位置处于市区背景噪音太大等因素, 1997 年 11 月将仪器移到位于距原台站 25 km 的市郊九峰地球动力学观测站(东经 114.49° , 北纬 30.52° , 测点高程 80.0 m)。考虑到仪器的搬家和升级更新, 需要测定新的标定常数, 因此, 利用合理方法精密测定标定因子, 不仅有益于观测资料结果精度的提高, 而且也可为国际资料交换提供高质量数据(Sun *et al.*, 2001)。本文将重点介绍利用 FG5 绝对重力仪 1999 年 1 月和 2000 年 8 月两期同址观测和该台站已知潮汐参数, 确定新的标定因子, 并讨论由不同方法获得的格值间的差异。

1 FG5 绝对重力仪和超导重力仪简介

随着近代新的电子和激光技术的快速发展, 新一代商业化可移动式绝对重力仪的研制成功为精密测定地球重力场的时间和空间变化提供了十分有效的工具(精度在 10^{-8} m/s^2 量级或更高)。中国科学院测量与地球物理研究所于 1995 年从美国 Micro-g 公司引进了一台 FG5 型绝对重力仪(Neibauer *et al.*, 1995; 王勇, 张为民, 1996)。这类仪器在技术方面的设计是基于自由落体方法测量垂直重力加速度(g)值。它的基本原理是采用稳定的氦氖(He-Ne)激光干涉仪(激光频率的稳定性可达 10^{-10} 以上), 在线式消除干涉仪基座倾斜引起的光速长度改变造成的系统误差。这类仪器的主要部分是由真空落体室、激光干涉测量系统、长周期活动垂直惯性系统(又称超长弹簧)、高速电子记时系统、先进的电子控制系统、实时数据采集系统以及数据处理软件系统等构成。利用由 PC 微机作为全自动控制系统直接测量的落体在自由下落过程中经过的位移和这段位移所需的时间, 直接求出垂直重力加速度。FG5 绝对重力仪的基本结构如图 1 所示。

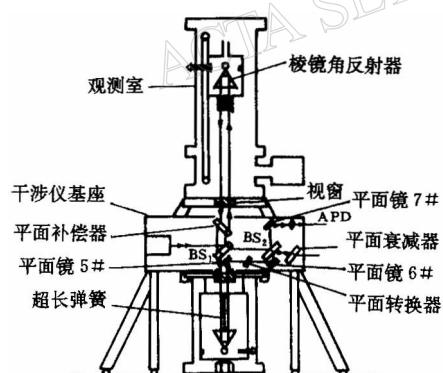


图 1 FG5 绝对重力仪结构示意图

小球在支悬线圈所产生的磁场的支持下悬浮在真空中。超导重力仪有两个不同的测量系统: 第一个测量系统由 6 个电极板组成的电容传感器组成, 用上下两个极板与小球之间的电容差测定小球的垂直位移变化, 用水平方向上的 4 个电极板与小球之间的电容差测定球

我国的超导重力仪是由美国 GWR 仪器公司生产的一种相对重力仪^①。图 2 给出了该类仪器内部结构传感器部分的示意图。由图可知,

^① Warbuton R J. 1985. *GWR Instruments Cryogenic Refrigerating Manual*. San Diego: University of California, 120

的水平位移;第二个系统是测量通过安置在小球下部的通量探测环的磁通量。这两套测量系统是并用的,以区别是由磁场还是由外力(主要是重力的变化)导致小球产生的位移。电容电路可提供反馈电压,使小球固定在探测环内某个相对的位置,磁场的变化取决于电容电路和探测环信号变化。在重力潮汐信号采集之前,观测系统设计有一套模拟低通滤波器,用变化的超导磁场替代普通重力仪中的弹簧系统,以保持重力场变化时超导小球在某一平衡位置,电压的变化随着重力场变化,我们只需测量反馈电路两端的电压变化就能获得观测值。由于传感器是放置在液态氮(4.2°K)中的,系统产生极为稳定的超导磁场,因此,超导重力仪具有极低的噪声水平和漂移率、极高的观测精度(10^{-9} m/s^2 量级或更高)和极宽的动态线性测量范围,这是其它任何一种弹簧重力仪无法达到的。

2 绝对重力仪和超导重力仪同址观测简介

2.1 1999年1月的第一期同址观测

为了能获得精度高和可靠性强的标定值,参照国际同行的经验,我们选择潮汐变化较大的时期进行绝对和超导重力仪的同址观测。根据潮汐的理论计算,我们选定的区间是1999年1月29日4时00分00秒~1999年2月1日6时26分20秒(格林威治时间)。FG5绝对重力仪架设在平行于超导重力仪观测室且相距10多米的房间内。由于重力场在两点的变化相同,因此,只需对绝对重力观测值作激光光速和仪器的有效高度改正。图3给出了1999年绝对重力仪和超导重力仪原始观测随时间变化情况,用“+”表示的粗线部分

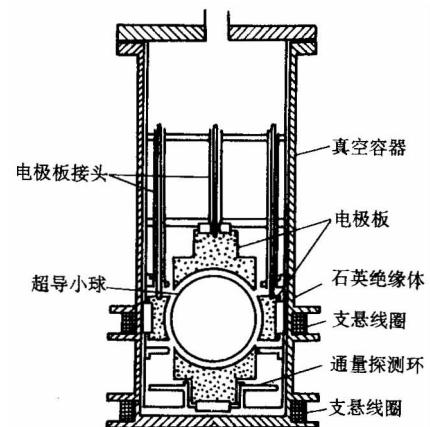


图2 超导重力仪内部结构示意图

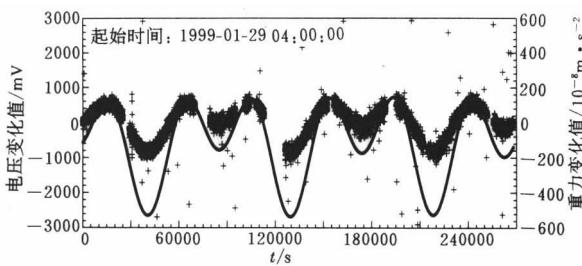


图3 1999年同址观测期间绝对重力仪(右侧纵坐标)和超导重力仪(左侧纵坐标)原始观测

部分表示绝对重力仪观测值,单位是 10^{-8} m/s^2 ,如右侧坐标轴所示。它是由不同落体观测组成,每个“+”表示一个落体。细实线部分表示超导重力仪观测值,单位是mV,如左侧坐标轴所示。由图可知,超导重力仪观测十分平滑且没有中断,但是绝对重力仪观测有许多离散值,这些离散数据是由于激光干涉测定的距离与时间间隔的脉冲数采样没有同步匹配所致,在计算仪器格值时必须将它们删除。绝对重力

仪测量过程是预先设定的,通过计算机自动控制完成。落体设定的基本原则是每20 s一次,每小时停测3分钟,观测时间长度共74小时26分20秒。因此,理论上讲可有12 733个观测值,但由于较大的电脉冲引起数据采集系统出现故障,引起许多中断。表1给出了

有关中断的详细情况, 共 13 次 2 465 个落体, 中断率达 19%, 扣除中断和各种异常数据以后, 实际用于计算标定因子的绝对重力观测值为 7 870 个.

表 1 第一期超导重力仪和绝对重力仪同址观测基本情况一览表

序号	FG5 绝对重力仪观测数据间断情况				间断长度	间断点数 (个)
	间断开始		间断结束			
	年-月-日	时:分:秒	年-月-日	时:分:秒		
1	1999-01-29	07:57:00	1999-01-29	08:29:40	32 分 40 秒	89
2	1999-01-29	10:57:00	1999-01-29	12:01:20	1 小时 4 分 20 秒	175
3	1999-01-29	23:27:20	1999-01-30	02:00:00	2 小时 32 分 40 秒	331
4	1999-01-30	04:26:40	1999-01-30	04:59:40	33 分	60
5	1999-01-30	06:26:40	1999-01-30	08:00:00	1 小时 33 分 20 秒	262
6	1999-01-30	08:56:40	1999-01-30	10:00:00	1 小时 3 分 20 秒	172
7	1999-01-30	11:27:00	1999-01-30	14:59:40	2 小时 32 分 40 秒	422
8	1999-01-30	22:19:00	1999-01-30	23:29:40	1 小时 10 分 40 秒	203
9	1999-01-31	02:26:40	1999-01-31	02:59:40	33 分	60
10	1999-01-31	08:27:00	1999-01-31	10:10:40	1 小时 43 分 40 秒	293
11	1999-01-31	11:56:40	1999-01-31	12:30:00	33 分 20 秒	91
12	1999-01-31	14:56:40	1999-01-31	15:44:40	48 分	135
13	1999-02-01	01:56:40	1999-02-01	03:00:00	1 小时 3 分 20 秒	172

GWR 超导重力仪观测情况: 1999 年 1 月 29 日 4 时 00 分 00 秒至 1999 年 2 月 1 日 6 时 26 分 20 秒超导重力仪观测无间断

2.2 2000 年 8 月的第二期同址观测

考虑到 1999 年同址观测存在的问题, 特别是太大的数据中断率, 我们重新设计了绝对重力仪和超导重力仪同址观测方案, 同样将观测周期选择在固体潮大潮期间. 从 2000 年 8 月 13 日 4 时 30 分 00 秒~8 月 16 日 4 时 39 分 40 秒(格林威治时间), 观测长度共 72 小时 30 分. 图 4 给出了本期绝对重力仪和超导重力仪原始观测随时间变化情况, 用“+”表示的粗线部分表示绝对重力仪观测值, 单位是 10^{-8} m/s^2 , 如右侧坐标轴所示. 与图 3 类似, 它是由不同落体观测组成, 每个“+”表示一个落体; 细实线部分表示超导重力仪观测值, 单位是 mV, 如左侧坐标轴所示. 与上期不同的是, 超导重力仪观测从 8 月 15 日 23 时 35 分 50 秒~8 月 16 日 3 时 36 分 10 秒出现中断, 长达 4 小时零 20 秒(表 2). 这一中断是较大的电脉冲引起数据采集系统出现故障所致. 分析表明, 绝对重力仪观测的离散度明显小于 1999 年 1 月份的观测离散度, 离散个数也少得多. 这是由于 FG5 仪器观测状态和台站气象因素比上一年度稳定的原因. 与上期测量相同, 绝对重力仪的测量过程是预先设定的, 所不同的是每次落体的时间为 10 s, 每观测 10 分钟, 停测 20 分钟, 因此, 我们共获得

表 2 第二期超导重力仪和绝对重力仪同址观测基本情况一览表

序号	GWR 超导重力仪观测数据间断情况				间断长度	间断点数 (个)		
	间断开始		间断结束					
	年-月-日	时:分:秒	年-月-日	时:分:秒				
1	2000-08-15	23:35:50	2000-08-16	03:36:10	4 小时 20 秒	721		

8 700个观测值。考虑到超导重力仪观测相对应的中断数,扣除中断和各种异常数据以后,实际应用于计算标定格值的绝对重力观测落体数为7 331个。

图5,6分别给出了1999年和2000年两次标定期间绝对重力仪和超导重力仪原始观测数据间的比较,超导重力仪观测到的电压变化作为x轴,绝对重力仪观测到的重力变化值作为y轴。由图可知,由于存在较好的线性关系,说明可用单一标定因子描述观测重力值和电压变化间的关系。

3 格值标定结果及讨论

在利用绝对重力仪观测数据计算标定格值时,首先要解决的问题是删除异常数据,然后利用多项式回归模型和最小二乘原理计算超导重力仪格值。根据统计学原理,用规定限差的方法(三倍中误差)可删除限差以外的错误数据。我们分别利用切比雪夫多项式和高斯函数法拟合长周期漂移项。当长周期漂移项的阶数相同时,数值结果说明两种方法得到的标定格值完全相同。因此,我们这里给出利用切比雪夫多项式拟合获得的1999年和2000年两期观测的标定格值。第一期的结果为 $-84.3637 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \cdot \text{V}^{-1}$,相对精度为0.33%;第二期的结果为 $-84.6242 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \cdot \text{V}^{-1}$,相对精度为0.20%。两者相差0.31%。后续的分析结果说明,第一期的格值偏小,精度也偏低,格值偏小的结果导致观测与理论间的偏差增大。

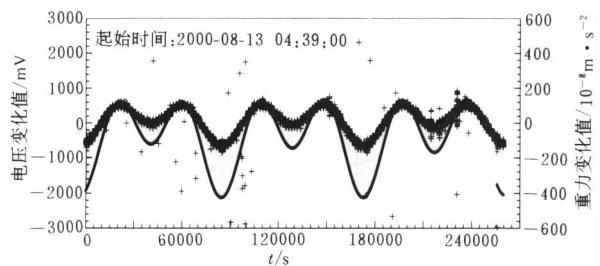


图4 2000年同址观测期间绝对重力仪(右侧纵坐标)和超导重力仪(左侧纵坐标)原始观测

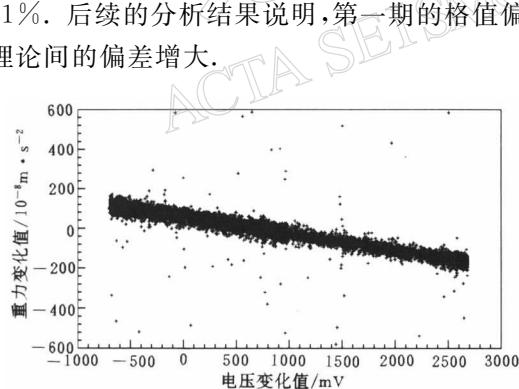


图5 1999年同址观测期间重力值与电压变化关系

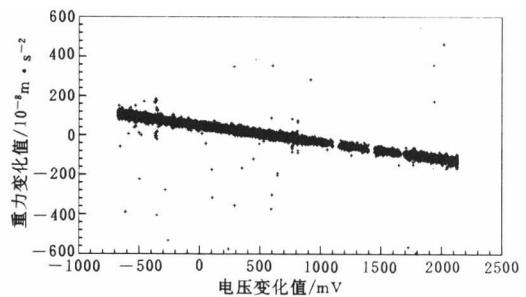


图6 2000年同址观测期间重力值与电压变化关系

利用2000年8月的同址观测资料,我们研究了不同观测限差和格值及其精度与落体间的关系。由图7可知,横向坐标为观测限差,单位是 10^{-8} m/s^2 。带圆点的曲线表示落体个数,如右侧坐标所示;带方块的曲线表示标定格值,如左侧坐标所示;带星花的曲线表示格值精度,如中间的坐标所示。粗实线是标定格值拟合曲线。分析表明,当观测限差选定在 $20 \times 10^{-8} \sim 35 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 之间、落体数在7 000以上时,标定格值的变化在0.3%范

围内；而当观测限差小于 20×10^{-8} 和大于 $35 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 时，标定格值有较大的偏离。这是由于观测误差引起的。当选观测限差为 $30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 时，我们利用 5 000 个落体滑动计算标定格值，然后取平均值，得到的格值为 $-84.6475 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \cdot \text{V}^{-1}$ ，相对精度在 0.20% 的量级。

为了比较不同落体数对标定因子的影响，我们对第二期的观测数据按不同落体数进行分段求格值，图 8 给出了所测定的格值与落体数之间的关系。由图 8 可知，当落体数超过 5 000 个时，标定值和精度趋于稳定。因此可认为，

图 7 第二期标定期间格值及其精度与观测限差和落体数之间的关系

用于确定格值的落体数已经满足。因此，当选定用绝对重力仪观测标定超导重力仪时，若按设计 10 秒钟一次落体、每观测 10 分钟停测 20 分钟的方案，如果获得的是有效落体，则测定标定因子所需长度至少为 50 小时。考虑到实际观测中总有异常数据出现，因此，选择 3 天周期作为同址观测可以满足格值精度要求。

除了选择用绝对重力测量对超导重力仪观测进行标定外，我们还采用了同一台站已知的主要潮汐波振幅因子加权求和的方法测定超导重力仪记录格值。所用的观测数据为 1999 年 1 月～2000 年 12 月武汉国际重力潮汐基准站超导重力仪每月观测数据。利用切比雪夫多项式对每月的观测值和重力潮汐理论模型值作拟合计算，获得了标定格值

图 8 第二期标定期间格值与落体数之间的关系

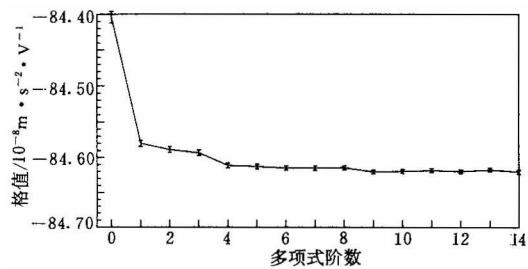


图 9 由已知潮汐参数获得的格值与切比雪夫多项式阶数之间的关系

的结果，虚线表示 p 取 8 时的结果，粗实线表示 p 取 9 时的结果。数值结果说明，当取 p 等于 8 和 9 时，结果间存在的差异很小。很显然，当 p 取 2 时所测定的格值与取 9 时的格

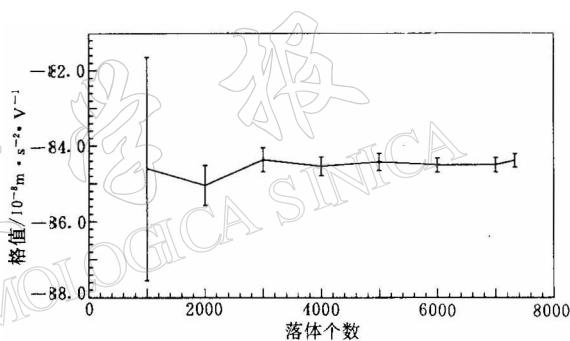


图 8 第二期标定期间格值与落体数之间的关系

值 ($Vauterin, 1998$)。研究表明，用切比雪夫多项式时阶数 p 应选择大于 4，这是因为 p 的选择会影响到拟合的稳定度。图 9 给出了由主波振幅因子加权求和获得的格值与切比雪夫多项式阶数之间的关系。由图可知，当阶数超过 5 时，格值和精度趋于稳定，因此，通常情况下取阶数 p 大于或等于 5 即可。图 10 给出了由该方法确定的标定因子随时间的变化情况，每一个月测定一个格值。细实线表示 p 取 2 时

值差异较大。这一点也可从图 8 中得到证明。另一方面, 格值随时间变化的特点也启示我们要定时作格值标定工作。数值结果说明, 格值最大值为 $-84.6707 \pm 0.0055 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \cdot \text{V}^{-1}$, 最小值为 $-84.5315 \pm 0.0036 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \cdot \text{V}^{-1}$, 变化幅度约为 0.16%, 取平均值得到 $-84.6011 \pm 0.0046 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \cdot \text{V}^{-1}$ 。

值得一提的是, 精密潮汐参数的测定不但需要精确的振幅标定因子, 而且也需要

要精确的仪器相位滞后改正, 目前我们使用 GWR 仪器生产厂家在实验室测定的相位滞后改正值。随着时间的推移和电子元件的老化, 仪器相位滞后会有一些变化, 尽管这种变化很小, 但仍需及时跟踪。国际同行已作了一些有益的尝试(VanCamp, 2000), 我们也正计划作这一方面的工作, 有关情况将另文讨论。

4 结论

综上所述, 我们认为处于良好状态下的绝对重力仪能够精确记录到重力场的潮汐变化, 利用绝对重力仪观测到的潮汐变化, 可对超导重力仪观测进行最小二乘多项式线性拟合获得标定值。另一方面, 采用同一台站已知的主要潮汐波振幅因子加权求和, 同样能获得精确的超导重力仪记录格值。分析可知, 由这种方法得到的标定精度明显优于由绝对重力测量得到的格值精度。上述不同处理方法得到不同格值, 但变化幅度在 0.3% 量级。考虑到 1999 年 1 月同址观测中的绝对重力测量的中断等问题, 因此, 不能将获得的标定结果用于实际的超导重力仪观测。我们采用了 2000 年绝对重力测量获得的格值, 同时, 考虑用主要潮波振幅因子加权求和方法测定的格值, 取平均值获得的最终格值为 $-84.6243 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2 \cdot \text{V}^{-1}$ 。标定格值精度在 0.2% 量级, 明显优于法国 Hinderer 获得的精度(0.72%), 与比利时 Francis 获得的标定格值精度(0.1%)为同一量级。

参加台站测量工作的还有张为民、郝兴华和郝晓光等同志, 特表谢意。

参 考 文 献

- 孙和平, 许厚泽. 1997. 国际地球动力学合作项目的实施与展望[J]. 地球科学进展, 12(2): 152~157
- 孙和平, 许厚泽, Ducarme B, 等. 1998. 中比法三国超导重力仪潮汐观测资料综合对比分析与研究[J]. 科学通报, 43(13): 1433~1438
- 孙和平, 许厚泽, 罗少聪. 1999. 用超导重力仪的潮汐观测资料研究海潮模型[J]. 测绘学报, 28(2): 115~120
- 王勇, 张为民. 1996. FG5 绝对重力仪[J]. 地壳形变与地震, 16(2): 94~98
- 徐建桥, 许厚泽, 孙和平, 等. 1999. 利用超导重力仪观测资料检测地球近周日共振[J]. 地球物理学报, 42(5): 599~608
- Francis O. 1997. Calibration of the C021 superconducting gravimeter in Membach (Belgium) using 47 days of absolute gravity measurements[A]. In: Segawa et al eds. Proc International Association of Geodesy Symposia, Gravity, Geoid and Marine Geodesy[C], 117: 212~219

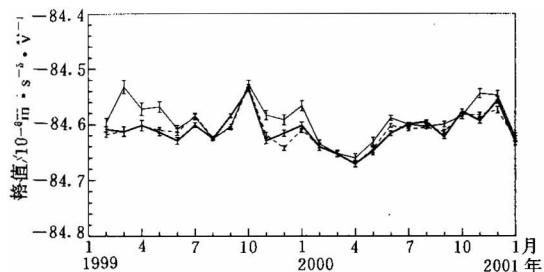


图 10 由已知潮汐参数获得的格值随时间变化

- Hinderer J, Florsch N, Makinen J, *et al.* 1991. On the calibration of a superconducting gravimeter using absolute gravity measurements[J]. *Geophys J Int*, **106**: 491~497
- Hsu H T, Sun H P, Xu J Q, *et al.* 2000. International tidal gravity reference values at Wuhan station[J]. *Science in China (Series D)*, **43**(1): 77~83
- Hsu H T, Becker M, Groten E, *et al.* 1989. Comparison of gravity tide observations by ET16 and ET21 at Wuhan station of China[J]. *Bull Inf Marees Terrestres*, **104**: 7 379~7 394
- Neibauer T M, Kloppong F J, Faller J E. 1995. The FG5 absolute gravimeter[J]. *Bur Grav Int Bull d'Inf Toulouse*, **11**: 1~2
- Sun H P, Takemoto S, Hsu H T, *et al.* 2001. Precise tidal gravity recorded with superconducting gravimeters at stations Wuhan/China and Kyoto/Japan[J]. *Journal of Geodesy*, **74**: 711~719
- VanCamp M. 2000. Accurate transfer function determination for superconducting gravimeters[J]. *Geophys Res Lett*, **27**(1): 37~40
- Vauterin P. 1998. Tsoft: Graphical and interactive software for the analysis of earth tide data[A]. In: Paquet P, Ducarme B eds. *Proc 13th Int Symp Earth Tides, Brussels*[C]. Brussels: Royal Observatory of Belgium, 481~486

ACCURATE DETERMINATION OF CALIBRATION FACTOR FOR TIDAL GRAVITY OBSERVATION OF A GWR- SUPERCONDUCTING GRAVIMETER

Sun Heping Chen Xiaodong Hsu Houtze Wang Yong

(Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract: It is recognized widely nowadays that the superconducting gravimeter (SG) is a kind of best relative gravimeter with high observing precision, good continuity and stability. However, it is necessary to calibrate the direct output (change in voltage) by using scale value (calibration factor) before getting the change of the real gravity field. Studies show that the accuracy of the scale value will influence the late analysis and explanation of the observations. By using absolute gravity measurements of a FG5 absolute gravimeter (AG) at Wuhan international tidal gravity fundamental station (two campaigns each for 3 days) and by using known tidal parameters at the same station, the calibration factors of the SG and their precision are studied in detail in this paper.

Key words: superconducting gravimeter; absolute gravimeter; tidal observation; calibration factor; precision analysis