



# FG5绝对重力仪观测数据的实测重力 潮汐改正

田桂娥<sup>1</sup> 陈晓东<sup>2</sup> 吴书清<sup>3</sup> 孙和平<sup>2</sup> 白磊<sup>2</sup> 桑鹏<sup>2</sup> 牛晓伟<sup>2</sup>

1 华北理工大学矿业工程学院,河北 唐山,063210

2 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

3 中国计量科学研究院,北京,100029

**摘要:**基于中国计量科学研究院北京昌平院区的超导重力仪iGrav-012实测重力潮汐数据,以FG5绝对重力仪为例研究了绝对重力观测中的实测潮汐改正问题,分析了用高精度超导重力仪获得的实测合成重力潮汐与理论合成重力潮汐间的差异。并采用iGrav-012超导重力仪和FG5X-249绝对重力仪两种实测数据对实测潮汐改正效果进行了验证。结果表明,FG5绝对重力仪中用的理论合成重力潮汐在考虑海潮重力影响后的结果与实测合成重力潮汐之差在 $1\mu\text{Gal}$ 之内,因此理论合成重力潮汐经过海潮重力影响改正后的结果可满足绝对重力观测精度要求,从观测精度来讲,无需对绝对重力的实测数据实施潮汐改正即可满足绝对重力观测的精度要求。但是FG5X-249绝对重力观测数据的潮汐改正结果表明,不同的潮汐改正方法对绝对重力观测值的影响不同,但这种影响较小,在 $0.1\mu\text{Gal}$ 的量级,因此建议只在高精度绝对重力观测中考虑实测重力潮汐改正。

**关键词:**绝对重力测量;重力潮汐改正;重力海潮负荷;FG5绝对重力仪;合成重力潮汐

**中图分类号:**P223

**文献标志码:**A

地球表面任一点的重力是指在该点的单位质量受到地球总质量的万有引力和地球自转产生的离心力的合力,测定该点重力值的大小就是绝对重力测量,绝对重力值是地表其他重力观测的基准<sup>[1-2]</sup>。绝对重力测量广泛应用于地震监测、地壳运动、地质勘探、导弹制导、地球内部物质结构反演等<sup>[3-7]</sup>。测定地表绝对重力值的仪器称为绝对重力仪,目前FG5绝对重力仪是国际上精度最高的商用绝对重力观测仪器<sup>[8]</sup>。

FG5绝对重力仪是自由落体型绝对重力仪,观测数据会受固体地球潮汐(固体潮)、海洋潮汐、大气变化、水质量迁移、极移、日长、重力梯度、有限光速、有效仪器高度等因素的影响<sup>[9-10]</sup>,因此要提高绝对重力测量的观测精度,必须有效去除这些干扰因素的影响。其中与仪器本身有关的影响因素包括有限光速、有效仪器高和重力梯度,在数据采集时已考虑了这3项影响因素;极

移和日长的重力影响可采用国际地球自转与参考系服务(international earth rotation and reference systems service, IERS)公布的极移和日长变化计算得到并改正;大气变化的重力影响通常采用经验大气重力导纳值 $-0.3\mu\text{Gal}/\text{mbar}$ 来改正;而水质量迁移的重力影响一般在绝对重力观测中不考虑,主要原因是其影响为季节性影响,而绝对重力观测一般时间比较短(约 $1\sim 3\text{d}$ )<sup>[11-12]</sup>。基于这些考虑,本文主要讨论固体潮和海潮对绝对重力观测的影响,且着重讨论实测重力潮汐的影响。

重力固体潮是影响绝对重力观测最大的干扰因素,地面重力固体潮根据纬度不同可引起 $200\sim 350\mu\text{Gal}$ 的重力变化<sup>[13]</sup>。中国大多数绝对重力观测点没有进行重力潮汐观测,固体潮改正用的是理论潮汐参数计算的理论重力固体潮。由于理论潮汐参数所用的地球模型与实际地球

收稿日期:2019-05-26

项目资助:国家自然科学基金委创新研究群体科学基金(41621091);国家自然科学基金(41574072);河北省高等学校科学技术研究项目(16275435)。

第一作者:田桂娥,硕士,主要从事重力潮汐和大地测量观测数据处理方面的研究。tianguie@163.com

通讯作者:陈晓东,博士,副研究员。chenxd@whigg.ac.cn

存在差异,因此采用理论固体潮代替实测潮汐会带来较大误差<sup>[14]</sup>。文献[15]通过对比不同潮汐因子差异对绝对重力测量的影响,认为选用实测潮汐因子更为准确。文献[16]指出,由于仪器中潮汐改正采用的理论潮汐因子与实际潮汐因子不同,因此对观测结果有一定影响。虽然已知仅用理论潮汐进行绝对重力观测潮汐改正会有差异,但目前鲜有用实测重力潮汐进行绝对重力改正的研究。

海洋潮汐会导致重力场发生变化,称为重力海潮负荷,其值可达 $3\sim 10\ \mu\text{Gal}$ <sup>[17]</sup>。由于近海海潮的影响,海潮重力影响在沿海比内陆更为明显;远离沿海地区的绝对重力观测,用不同海潮模型计算的海潮重力影响无明显实质性的差异<sup>[18-19]</sup>。采用精确的海潮模型能够去除 80% 或更多的海潮负荷对地表重力观测值的影响。FG5 绝对重力仪软件 g 中内嵌 Sch80、FES2004 和 CSR3.0 3 个全球海潮模型,用这 3 个海潮模型计算的海潮重力负荷效应大致相等<sup>[20]</sup>。在实际绝对重力测量中可选其中一个进行海潮重力负荷效应改正,另外也可自行加入海潮模型。本文以 g 软件中内嵌的 FES2004 全球海潮模型为例,详细研究了在北京昌平绝对重力观测中海潮重力的影响。

本文基于中国计量科学研究院北京昌平院区 iGrav-012 超导重力仪的实测重力潮汐数据,以 FG5X-249 绝对重力观测为例,详细研究了绝对重力观测中的实测重力潮汐改正问题,以及考虑

海潮重力影响对绝对重力观测的必要性。并分析了用高精度超导重力仪获得的实测合成重力潮汐与理论合成重力潮汐间的差异,为绝对重力观测中的潮汐改正提供可靠依据。

## 1 实测合成重力潮汐及其与理论合成重力潮汐的对比分析

理论合成重力固体潮是通过理论潮汐模型计算获得,实测合成重力固体潮则是通过地面固定点进行连续重力潮汐观测得到。但由于地下水、大气和海洋等全球和区域因素的影响,理论与实测重力固体潮间必定会有差异。为了研究这种差异对地表绝对重力测量中的影响,本文计算了用超导重力仪观测数据得到的实测合成重力潮汐和根据文献[21]的重力潮汐理论模型得到的理论合成重力潮汐之间的差异。所用观测数据为中国计量科学研究院 iGrav-012 超导重力仪在 2014-06-08—2015-12-02 共计 543 天的数据,预处理后的 1 h 采样重力潮汐和台站大气压力观测数据如图 1 所示。利用 FG5X-249 绝对重力仪和 iGrav-012 的同址观测数据测定了 iGrav-012 的格值为 $-92.834\ 4\pm 0.023\ 7\ \mu\text{Gal}/\text{V}$ ,相对精度为 0.03%,测定精度高于潮汐参数估算要求精度(0.1%)。从图 1(a)中可以看出,重力潮汐观测数据的峰对峰幅度约为 $300\ \mu\text{Gal}$ ,远大于绝对重力观测精度,因此绝对重力观测中必须进行潮汐改正。

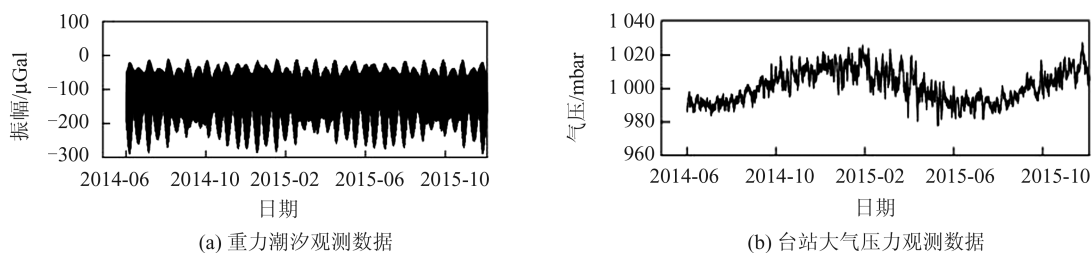


图 1 重力潮汐和台站大气压力观测数据

Fig.1 Observed Gravity Tides and Station Air Pressure Data

实测潮汐参数采用潮汐数据调和软件 ETERNA 进行估算,估算的实测潮汐参数见表 1。表 1 中的潮汐参数即为本实验所采用的实测合成重力潮汐参数。理论重力潮汐参数采用 FG5 重力仪 g 软件中内置的固体潮理论模型,相应的理论潮汐参数也在表 1 中给出,由于理论重力潮汐参数中的相位偏移为零,因此表 1 中仅列出了理论振幅因子。从表 1 中可以看出,理论振幅因子与实测振幅因子差别小于 0.03,仅 MM、MF 和

MTM 潮波的实测振幅因子与理论振幅因子差别稍大,但最大差别也小于 0.10。利用表 1 中给定的潮汐参数,采用 ETERNA 软件包中的 PREDICT 计算程序分别对理论和实测合成重力固体潮进行了计算,计算时考虑的改正项参数见表 2,计算结果分别见图 2(a)、2(b)。FG5 绝对重力仪中 g 软件内置的 ETGTAB 是 PREDICT 的前身,ETGTAB 于 1996 年升级并改名为 PREDICT,其计算精度达到 nGal 量级<sup>[22]</sup>。

表1 iGrav-012观测数据估算的实测潮汐参数及对应的理论潮汐参数

Tab.1 Tidal Parameters Estimated with iGrav-012 Observations and the Corresponding Theoretical Tidal Parameters

起始频率/ (周·d <sup>-1</sup> )	终止频率/ (周·d <sup>-1</sup> )	潮波	实测振幅 因子	实测振幅 因子标准差	实测相位 滞后/(°)	实测相位滞后 标准差/(°)	理论振幅 /μGal	理论振幅 因子
0.000 146	0.044 653	MM	1.135 33	0.086 95	−6.422 4	4.421 7	0.841 86	1.185 10
0.060 131	0.080 798	MF	1.254 83	0.051 74	0.485 5	2.378 9	1.593 75	1.185 10
0.096 422	0.249 952	MTM	1.095 05	0.168 96	0.523 5	8.846 1	0.305 14	1.185 10
0.721 499	0.833 113	SGQ1	1.145 29	0.020 42	−0.957 1	1.021 7	0.226 24	1.154 67
0.851 181	0.859 691	2Q1	1.188 35	0.006 98	0.500 0	0.336 5	0.775 93	1.154 62
0.860 895	0.870 024	SGM1	1.160 39	0.005 79	0.150 4	0.286 1	0.936 47	1.154 61
0.887 326	0.896 130	Q1	1.170 50	0.000 92	0.255 3	0.045 1	5.864 02	1.154 51
0.897 806	0.906 316	RO1	1.166 02	0.005 11	−0.264 0	0.251 2	1.113 85	1.154 50
0.921 940	0.930 450	O1	1.169 13	0.000 17	0.178 9	0.008 6	30.627 47	1.154 31
0.931 963	0.940 488	TAU1	1.175 46	0.008 51	0.373 7	0.414 6	0.399 46	1.154 26
0.958 085	0.966 757	NO1	1.165 85	0.001 61	0.307 3	0.078 9	2.408 73	1.153 71
0.968 564	0.974 189	CHI1	1.175 86	0.011 64	1.109 8	0.567 2	0.460 68	1.153 53
0.989 048	0.998 029	P1	1.162 98	0.000 31	−0.004 1	0.015 3	14.250 90	1.148 78
0.999 852	1.000 148	S1	1.130 95	0.018 82	2.260 6	0.959 6	0.337 00	1.145 35
1.001 824	1.013 690	K1	1.148 79	0.000 12	−0.005 3	0.005 8	43.074 09	1.133 30
1.028 549	1.034 468	TET1	1.197 69	0.011 62	−0.218 1	0.555 6	0.460 59	1.156 55
1.036 291	1.044 801	J1	1.166 15	0.002 22	−0.258 1	0.108 9	2.408 65	1.156 32
1.064 840	1.071 084	SO1	1.150 74	0.014 10	−0.365 0	0.702 3	0.399 55	1.155 66
1.072 582	1.080 945	OO1	1.164 79	0.005 49	−0.356 4	0.270 2	1.317 97	1.155 60
1.099 160	1.216 398	NU1	1.146 56	0.027 20	−0.018 7	1.359 0	0.252 34	1.155 38
1.719 380	1.837 970	EPS2	1.190 12	0.006 68	−0.047 9	0.321 8	0.323 25	1.158 36
1.853 919	1.862 429	2N2	1.181 52	0.002 30	−0.109 7	0.111 3	1.108 59	1.158 36
1.863 633	1.872143	MU2	1.174 63	0.001 86	−0.175 3	0.090 7	1.337 89	1.158 36
1.888 386	1.896 749	N2	1.170 40	0.000 30	−0.218 1	0.014 7	8.377 74	1.158 36
1.897 953	1.906 463	NU2	1.172 40	0.001 55	−0.358 1	0.075 7	1.591 27	1.158 36
1.923 765	1.942 754	M2	1.168 85	0.000 06	−0.028 8	0.002 8	43.757 08	1.158 36
1.958 232	1.963 709	LAM2	1.158 89	0.007 62	0.329 2	0.376 7	0.322 67	1.158 36
1.965 826	1.976 927	L2	1.165 96	0.001 81	0.001 7	0.089 1	1.236 80	1.158 36
1.991 786	1.998 288	T2	1.172 98	0.002 21	−0.363 5	0.108 1	1.190 26	1.158 36
1.999 705	2.000 767	S2	1.169 28	0.000 13	−0.196 7	0.006 3	20.358 10	1.158 36
2.002 590	2.013 690	K2	1.169 85	0.000 61	−0.053 3	0.030 0	5.534 37	1.158 36
2.031 287	2.182 844	2K2	1.190 37	0.012 19	0.403 5	0.586 5	0.309 44	1.158 36
2.753 243	3.937 898	M3M4	1.075 06	0.002 68	0.111 1	0.142 7	0.656 33	1.070 54

表2 理论与实测合成重力潮汐改正项参数

Tab.2 Correction Parameters of Theoretical and the Observed Gravity Tides

改正项参数	理论合成 重力潮汐	实测合成 重力潮汐
潮汐参数	理论潮汐参数	观测潮汐参数
潮波分波表	Tamura 1987	Tamura 1987
极移因子	1.16	1.16
日长因子	1.16	1.16

由表2可以看出,理论与实测合成重力固体潮的区别仅在于潮汐参数不同。两者均采用相同的极移和日长重力潮汐因子,因此两者计算

结果间的差异反映了理论与实测合成重力固体潮间的差异,且实测重力潮汐参数含有海潮的影响,而理论重力潮汐参数没有考虑海潮的影响。

由图2(c)可以看出,北京昌平站实测和理论重力固体潮之差在±2 μGal范围内,这个差别大于绝对重力的观测精度(±1 μGal),所以只考虑理论潮汐改正不能满足绝对重力的观测要求。且二者之差中含有明显的周期性信号,这些信号主要是海潮信号,因此海潮信号对北京昌平重力观测的影响在±1 μGal范围内。虽然这个影响的量级相对于重力潮汐较小,但是大

于绝对重力的观测精度,所以在绝对重力观测中必须考虑海潮重力影响改正。

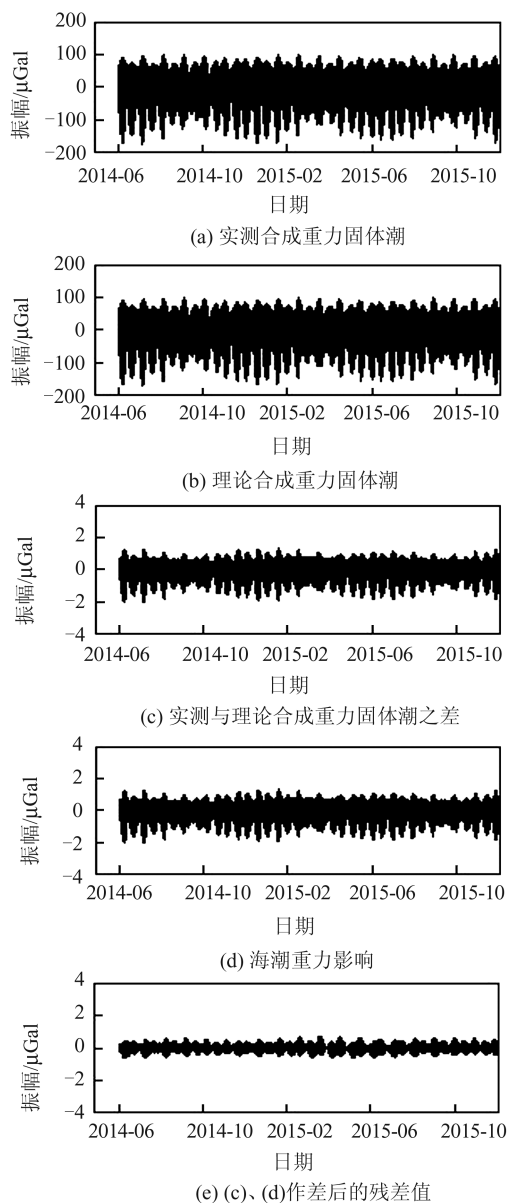


图2 实测与理论合成重力固体潮及海潮重力影响  
Fig.2 Observed and Theoretical Gravity Tides and the Gravity Ocean Tide Loading

为了研究海潮对绝对重力测量的影响,本文采用与FG5绝对重力仪观测数据中同样的海潮模型FES2004计算北京昌平站2014-06-08—2015-12-02的海潮重力影响,结果见图2(d)。从图2(d)中可以看出,昌平站的海潮重力影响峰对峰约为 $2\mu\text{Gal}$ ,大于绝对重力观测精度,所以在绝对重力观测中必须要考虑。比较图2(c)、2(d)可以看出,图2(c)、2(d)在峰值和谷值的变化上有非常好的对应关系,并且在幅度上也大致相等,证明实测与理论合成重力固体潮之差

中,海潮的影响占主要成分。图2(e)为实测与理论合成重力固体潮之差扣除了海潮重力影响的结果,所有数值均在 $\pm 0.6\mu\text{Gal}$ 范围内,说明在iGrav-012长达543天的观测中,考虑海潮重力影响后的理论合成重力潮汐与实测合成重力潮汐大致相等,差别小于绝对重力测量精度要求( $1\mu\text{Gal}$ ),说明理论合成重力潮汐在考虑海潮重力影响改正后可满足绝对重力观测精度要求。

虽然采用实测合成重力潮汐的改正效果更好,但是实测潮汐需要较长时间(一般大于6个月)高精度的台站连续重力潮汐观测来测定,而且绝对重力测点多数情况下没有这样长时间的重力潮汐观测数据,因此没有必要采用实测合成重力潮汐进行潮汐改正。从图2(d)的重力残差中仍可看出微弱但很明显的以半月或月为周期的信号,产生该信号的主要原因是实测合成潮中所用的MM、MF和MTM 3个潮波的实测潮汐参数与理论值差别太大,其主要原因是台站的重力潮汐观测数据时间长度不足,难以精确估算长周期的潮汐波,但是由于这3个潮波的振幅较小,因此这种差别在潮汐改正中可以忽略。海潮改正中仅仅是对主潮波进行了改正,长周期波和其余的潮波都未进行改正,这也是图2(e)中剩余的信号中长周期波周期性信号非常明显的原因之一。

## 2 利用实测数据验证实测重力潮汐改正效果

本文采用两种实测数据进行实测潮汐改正效果验证:(1)iGrav-012超导重力仪实测重力潮汐数据;(2)FG5X-249绝对重力仪实测绝对重力数据。利用残差标准差来衡量改正效果的优劣,标准差越小,说明潮汐改正效果越好。

### 2.1 利用iGrav-012超导重力仪实测重力潮汐数据验证潮汐改正效果

实验数据如图1所示。图3(a)黑色曲线给出了实测重力潮汐观测数据扣除实测合成重力固体潮后得到的实测重力潮汐残差(已考虑了实测大气重力导纳值计算的大气重力影响和极移、日长的重力影响)。为了进行比较,图3(b)黑色曲线给出了实测重力潮汐观测数据扣除理论重力固体潮后得到的理论重力潮汐残差(已考虑了实测大气重力导纳值计算的大气重力影



响和极移、日长的重力影响,没有考虑海潮重力影响);图3(c)黑色曲线给出了在图3(b)的基础上扣除了海潮重力影响的重力残差。由图3可知,3个重力残差中扣除实测合成重力固体潮的重力残差曲线宽度最窄,潮汐改正效果最好;仅扣除理论重力固体潮的重力残差潮汐改正效果最差;而扣除了理论重力固体潮和海潮重力影响的重力残差潮汐改正效果居中。可利用图3中各残差序列高频部分的标准差来衡量改正效果,首先需要去掉序列中的长期重力变化,去掉长期重力变化后的高频重力残差见图4。然后采用多项式低通滤波的方法(窗宽100,多项式次数为9)提取长期重力变化(见图5中的红色曲线),比较滤波得到的长期重力变化(见图3中的红色曲线)和原来的重力残差(见图3中黑色曲线),可以看出多项式低通滤波的方法能够有效获取重力残差中的长期重力变化,剩余的部分可认为是高频随机噪声,该结论从图4中也可得到证明。

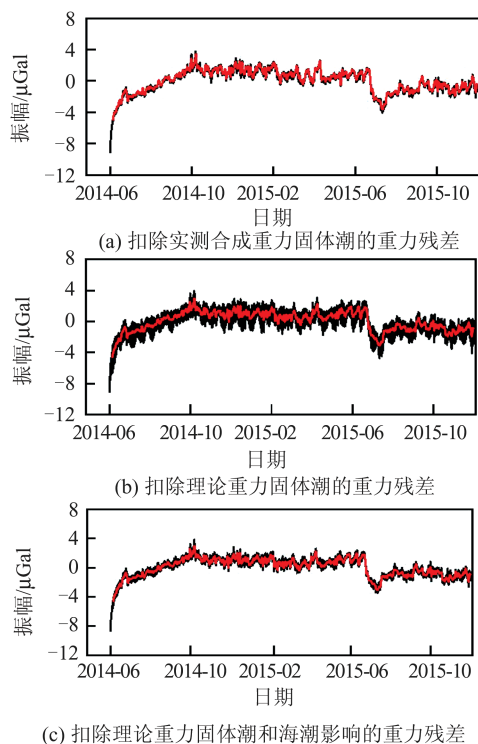


图3 iGrav-012重力潮汐观测数据扣除不同潮汐的重力残差序列

Fig.3 Time Series of Gravity Residual of iGrav-012 Considering Different Tidal Corrections

图4是图3中的重力残差(黑色曲线)去掉长期重力变化(红色曲线)后得到的重力残差的高频部分(本文称为高频重力残差),主要是数据中的随机噪声部分,其方差可认为是衡量潮汐改正

效果的数值标准。由图4(b)还能明显看到周期性信号的存在,这个明显的周期性信号主要是海潮引起的,所以去掉了海潮影响后的高频重力残差(见图4(c))基本上消除了海潮信号的影响,残余的数据基本可认为是高频噪声,这也说明了海潮改正的必要性。计算图4(a)、4(b)和4(c)中各残差序列的均方差,结果分别为 $0.127\ 59\ \mu\text{Gal}$ 、 $0.645\ 39\ \mu\text{Gal}$ 和 $0.253\ 90\ \mu\text{Gal}$ ,因此iGrav-012超导重力仪观测数据采用实测合成重力潮汐计算的高频重力残差和采用理论重力潮汐并考虑了海潮影响之后计算的高频重力残差都小于 $1\ \mu\text{Gal}$ ,精度非常高,其中实测合成重力潮汐的改正效果最好,可用于高精度重力观测的潮汐改正。

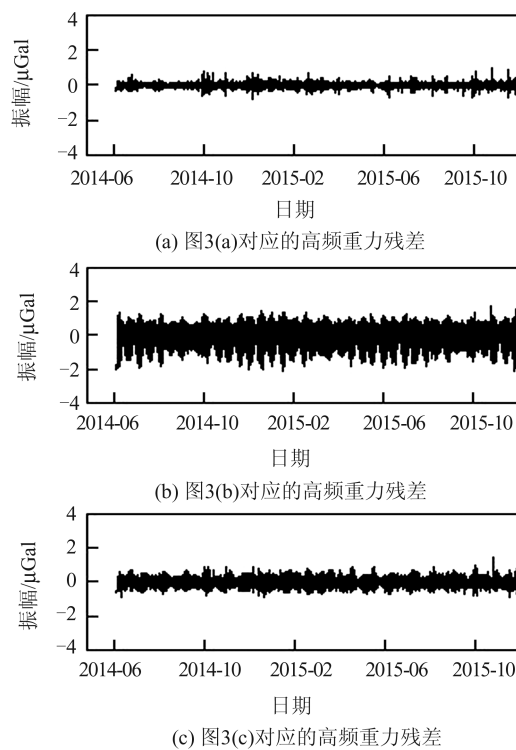


图4 高频重力残差

Fig.4 High-Frequency Gravity Residuals

## 2.2 利用FG5X-249绝对重力仪实测绝对重力数据验证潮汐改正效果

实验数据为北京昌平站FG5X-249绝对重力仪2016-01-08 08:00:00—2016-01-13 07:24:55的实测绝对重力观测数据,采样间隔为15 s,在1 h内观测100个落体为一组,即每组观测时长为24 min 45 s,共计12 000个落体,共计120 h(5 d)的观测数据,该数据已进行了仪器高改正、激光光速改正和垂向梯度改正。在绝对重力观测中,一组观测的均值为一个观测值(组内数据采用3

倍中误差原则剔除异常观测),多组观测的均值为一期观测的最终值。

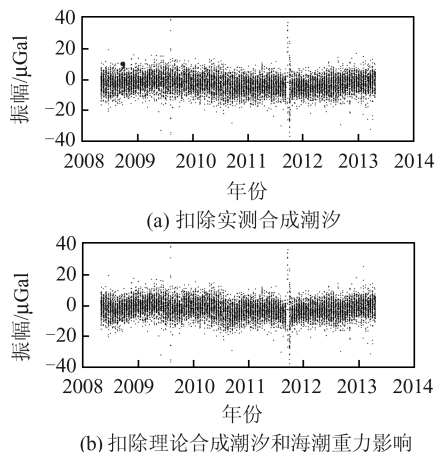


图 5 FG5X-249 绝对重力观测每个落体的残差值  
Fig.5 Residual Values of Each Drop Observed with FG5X-249 Absolute Gravimeter

首先分别计算每个落体扣除实测合成重力潮汐、理论合成重力潮汐并考虑了海潮重力影响的残差值时间序列,结果分别如图 5(a)、5(b)所示。由图 5 可知,从每个落体的残差值来看,两种潮汐改正的精度几乎一样,都在  $\pm 20 \mu\text{Gal}$  范围内,只是用后者改正后的落体残差值略微比用前者改正的残差值弯曲些,说明潮汐改正对绝对重力观测值的大小有影响。然而图 5 显示两种潮汐改正对于绝对重力观测值精度的影响非常小,无需考虑;1 月 11 日的观测有几组残差比较大,属于异常观测。

然后计算北京昌平站 FG5X-249 绝对重力仪每组观测分别扣除实测合成重力潮汐、理论合成重力潮汐加上海潮重力影响后的绝对重力观测值及其精度,结果分别如图 6(a)、6(b)所示,其中黑色直线表示不包括 82 和 83 组观测值的均值。由图 6 可知,两种潮汐改正后的观测值有明显差别,用前者改正后的绝对重力值比用后者改正后的绝对重力值要平滑得多,这充分说明了实测合成重力潮汐改正在绝对重力观测中更为精确和有效,也说明了实测合成重力潮汐改正在高精度绝对重力观测中的重要性。从图 6 中可以看出,本文所用的 120 组数据中有两组精度比较差(82 和 83 组)。这两组计算的精度明显比其他组低,属于异常观测组,在最终计算该期结果时要舍弃。

表 3 给出了去掉和未去掉 82 和 83 组的最终计算结果,每组结果又分别计算了用实测合成重力潮汐、理论重力潮汐加上海潮影响改正得到的观测值及其精度。由表 3 可知,前者改正后

的精度为  $1.474 8 \mu\text{Gal}$ ,后者改正后的精度为  $2.264 5 \mu\text{Gal}$ ,二者在同一量级。但是实测潮汐改正后的最终测定值为  $-354.573 1 \mu\text{Gal}$ ,而理论合成重力固体潮加海潮改正后的最终期测定值为  $-354.720 1 \mu\text{Gal}$ ,两者相差  $0.147 0 \mu\text{Gal}$ ,这个结果说明两种不同的潮汐改正对绝对重力观测值有影响,且影响比较小,其量级比绝对重力观测精度要低一个数量级。因此采用理论合成重力潮汐加上海潮影响能满足 FG5 绝对重力观测精度的要求,但是与实测重力潮汐相比,这两种不同的潮汐改正对绝对重力观测值有影响,虽然影响比较小,仍建议在精确绝对重力测量(例如绝对重力比对观测)中还是要考虑这种影响。

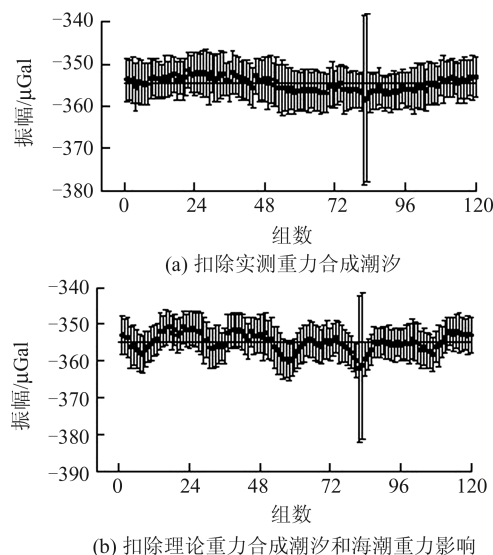


图 6 FG5X-249 绝对重力观测每组观测值及其精度  
Fig.6 Observed Values and Their Accuracies for Each Set of FG5X-249 Absolute Gravimeter

### 3 结 语

本文基于中国计量科学研究院北京昌平院区的超导重力仪 iGrav-012 实测的重力潮汐,以 FG5 绝对重力仪为例深入研究了绝对重力观测中的潮汐改正问题。研究结果表明,实测合成重力潮汐与理论合成重力潮汐之间的差异主要是海潮重力影响,加上海潮重力影响后的理论合成重力潮汐与实测合成重力潮汐对绝对观测精度的影响非常小,可以忽略。实验结果表明,北京昌平站的海潮重力影响峰对峰约为  $2 \mu\text{Gal}$ ,大于绝对重力观测精度,所以在用理论合成重力潮汐进行潮汐影响改正时必须考虑。

用 iGrav-012 超导重力仪和 FG5X-249 绝对重

表3 FG5X-249绝对重力观测和最终测定结果的部分观测值及其精度

Tab.3 Observed Values and Their Accuracies of Some Sets of FG5X-249 Absolute Gravimeter and Finally Determined Values and Their Accuracies

组数	实测合成重力固体潮改正后的观测值及其精度/ $\mu\text{Gal}$	理论合成重力固体潮加上海潮影响改正后的观测值及其精度/ $\mu\text{Gal}$
1	$-353.675\ 3\pm 5.152\ 1$	$-352.923\ 7\pm 5.151\ 1$
2	$-353.873\ 1\pm 4.786\ 1$	$-353.430\ 9\pm 4.791\ 1$
82	$-358.580\ 2\pm 142.793\ 7$	$-362.062\ 1\pm 142.793\ 6$
83	$-357.929\ 2\pm 12.805\ 5$	$-361.231\ 7\pm 12.810\ 8$
包含82和83组的测定值	$-354.634\ 5\pm 1.537\ 6$	$-354.835\ 6\pm 2.416\ 1$
剔除82和83组的最终测定值	$-354.573\ 1\pm 1.474\ 8$	$-354.720\ 1\pm 2.264\ 5$

力仪的实测数据分别验证了实测合成重力潮汐、理论合成重力潮汐加上海潮重力影响这两种潮汐改正方法的实际效果。结果表明,iGrav-012超导重力仪观测数据用实测合成重力潮汐、理论合成重力潮汐加上海潮影响之后计算的高频重力残差的标准差分别为0.127 59  $\mu\text{Gal}$ 和0.253 90  $\mu\text{Gal}$ ,都小于绝对重力仪的观测精度,且其差别非常小,可忽略。但从实际分析来讲,实测合成重力潮汐的改正效果最好。FG5X-249绝对重力仪的实测数据的分析结果表明,两种改正方法对观测值分析精度影响非常小,可忽略;但是两种潮汐改正方法对绝对重力观测值有影响,其影响比绝对重力仪的观测精度小一个数量级,因此建议在精确绝对重力观测(例如绝对重力比对观测)中应该考虑。

参 考 文 献

[1] E Dongchen, He Zhitang, Wang Zemin, et al. Establishment of Absolute Gravity Datum in Great Wall Station, West Antarctica[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(8): 688-691(鄂栋臣,何志堂,王泽民,等. 中国南极长城站绝对重力基准的建立[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007, 32(8): 688-691)

[2] Xing Lelin, Li Hui, Li Jianguo, et al. Establishment of Absolute Gravity Datum in COMNOC and Its Application[J]. *Acta Geodactica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(5): 538-543(邢乐林,李辉,李建国,等. 陆态网络绝对重力基准的建立及应用[J]. 测绘学报,2016, 45(5): 538-543)

[3] Sun Heping, Liu Qingchao, Cui Xiaoming, et al. Detection of the Geodynamics of Earth's Liquid Core by Using Gravity and VLBI Techniques[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2 058-2 063(孙和平,刘清超,崔小明,等. 利用重力和VLBI技术检测地球

液态核的动力学效应[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12):2 058-2 063)

[4] Zhang Chuanyin, Wang Wei, Gan Weijun, et al. Monitoring Temporal and Spatial Changes of Crustal Deformation and Gravity Field Caused by Environmental Load in the Three Gorges Reservoir Region Based on CORS Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(9): 1 287-1 294(章传银,王伟,甘卫军,等. 利用CORS站网监测三峡地区环境负荷引起的地壳形变与重力场时空变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(9): 1 287-1 294)

[5] Sato T, Miura S, Sun W K, et al. Gravity and Uplift Rates Observed in Southeast Alaska and Their Comparison with GIA Model Predictions [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2012, 117(B1): B01401

[6] Yue Jianli, He Zhitang, Zhu Yiqing, et al. Study of Ground Water Settlement by Absolute Gravity Measurement[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(7):18-20(岳建利,何志堂,祝意青,等. 利用绝对重力测量对大地原点地下水沉降的研究[J]. 测绘科学,2010, 35(7): 18-20)

[7] Xiao Fan, Wang Qingbin, Zhang Songtang, et al. Accurate Recording of M6.0 Earthquake in Japan Sea Area by Absolute Gravimeter[J]. *Geospatial Information*, 2012, 10(6): 10-12(肖凡,王庆宾,张松堂,等. 绝对重力仪对日本海域6.0级地震的精确纪录[J]. 地理空间信息,2012, 10(6): 10-12)

[8] Niebauer T M, Sasagawa G S, Faller J E, et al. A New Generation of Absolute Gravimeters [J]. *Metrologia*, 1995(32): 159-180

[9] Xiao Fan. Research on the Effect Factors for the High Precision Absolute Gravity Surveying Using FG5 [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2012(肖凡. FG5高精度绝对重力测量影响因素研究[D]. 郑州:信息工程大学,2012)

[10] Wang Yong, Zhang Weimin, Wang Hubiao, et al.

- Tidal Correction of Absolute Gravity Measurements [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2003, 23(2): 65-68(王勇, 张为民, 王虎彪, 等. 绝对重力观测的潮汐改正[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(2): 65-68)
- [11] Zhao Luocheng, Luo Zhicai, Xu Chuang, et al. The New Method of Tidal Correction for Gravity Measurement on Island[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(7): 913-917(赵路成, 罗志才, 许闯, 等. 岛礁重力测量潮汐改正新方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(7): 913-917)
- [12] Li Jia. Research of the Background Environmental Impact in the Absolute Gravity Measurement[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016(李嘉. 绝对重力测量中背景环境影响的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016)
- [13] Chen Xiaodong. Preprocessing and Analytical Results of the Tidal Gravity Observations Recorded with Superconducting Gravimeter at Jiufeng Station, Wuhan[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2003(陈晓东. 武汉九峰台超导重力仪固体潮观测资料的预处理和分析结果[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2003)
- [14] Wang Qingbin, Wu Xiaoping. The Correction for Absolute Gravity Measurement[J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2001, 18(3): 160-163(王庆宾, 吴晓平. 绝对重力测量值的改正[J]. 测绘学院学报, 2001, 18(3): 160-163)
- [15] Zhang Hongwei, Dong Chaoyang, Zhao Dongming, et al. Latest Absolute Gravity Measurement at Some Points of 2000 National Basic Gravity Network [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(4): 52-55(张宏伟, 董朝阳, 赵东明, 等. 2000 国家重力基本网部分站的最新绝对重力测量[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(4): 52-55)
- [16] Xuan Songbai, Xing Lelin, He Zhitang, et al. Comparative Experiment of Absolute Gravimeter Surveying in China Mainland[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(4): 72-74(玄松柏, 邢乐林, 何志堂, 等. 国内绝对重力实验观测比对[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(4): 72-74)
- [17] Sun Heping, Ducarme B, Xu Houze, et al. Research the Fitness the Models of Ocean Tide and Solid Tide Based on Global Super-Conducting Gravimeter Observations[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2005, 35(7): 649-657(孙和平, Ducarme B, 许厚泽, 等. 基于全球超导重力仪观测研究海潮和固体潮模型的适用性[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2005, 35(7): 649-657)
- [18] Xu Houze. Tide Corrections of Precise Gravity Measurements[J]. *Acta Geodactica et Cartographica Sinica*, 1984, 13(2): 88-93(许厚泽. 精密重力测量的潮汐改正[J]. 测绘学报, 1984, 13(2): 88-93)
- [19] Ji Lidong, Zhang Quan, Zhang Hongwei, et al. On the Tide Correction of High-Precision Gravity Measurements[J]. *Journal of Geomatics*, 2014, 39(1): 26-28(纪立东, 张权, 张宏伟, 等. 潮汐对高精度重力测量的改正分析[J]. 测绘地理信息, 2014, 39(1): 26-28)
- [20] Van C M. Efficiency of Tidal Corrections on Absolute Gravity Measurements at the Membach Station [J]. *Proceedings of the Workshop: IMG - 2002*, 2003, 22: 99-103
- [21] Dehant V, Defraigne P, Wahr J M. Tides for a Convective Earth [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1999, 104(B1): 1 035-1 058
- [22] Wenzel H G. The Nanogal Software: Earth Tide Data Processing Package Eterna3.30 [J]. *Bulletin d'Information de Marees Terrestres*, 1996 (124): 9 425-9 439



## Correction of Measured Gravity Tides with FG5 Absolute Gravimeter Observations

TIAN Gui'e<sup>1</sup> CHEN Xiaodong<sup>2</sup> WU Shuqing<sup>3</sup> SUN Heping<sup>2</sup> BAI Lei<sup>2</sup>  
SANG Peng<sup>2</sup> NIU Xiaowei<sup>2</sup>

<sup>1</sup> North China University of Science and Technology, College of Mining Engineering, Tangshan 063210, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

<sup>3</sup> National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

**Abstract:** The tidal correction on data recorded with FG5 absolute gravimeter is investigated in the study using gravity tides observed with a superconducting gravimeter iGrav-012 installed at Beijing Changping station, National Institute of Metrology, China. The difference between measured synthetic gravity tidal and theoretical synthetic gravity tidal obtained by high precision superconducting gravimeter is analyzed. Two kinds of measured data obtained by iGrav-012 superconducting gravimeter and FG5X-249 absolute gravimeter were used to verify the correction effect of measured tides. Numerical results show that the difference between the observed gravity tides and the theoretical gravity tides considering ocean loading effect is less than 1  $\mu\text{Gal}$ , which is lower than the observed accuracy of FG5 gravimeter. As a conclusion, it is not necessary to consider the tidal correction with observed tides from the view of the observed accuracy. However, the results from the FG5X-249 absolute gravimeter indicate that different methods of tidal correction can change the absolute gravity value itself. Although this change is very small and at the order of 0.1  $\mu\text{Gal}$ , tidal correction using observed tide is still recommended in precise absolute gravimetry.

**Key words:** absolute gravimetry; correction of gravity tides; gravity ocean tide loading; FG5 absolute gravimeter; synthesized gravity tides

**First author:** TIAN Gui'e, master, specializes in data processing of gravity tides and geodesy. E-mail: tianguie@163.com

**Corresponding author:** CHEN Xiaodong, PhD, associate professor. E-mail: chenxd@whigg.ac.cn

**Foundation support:** Science Foundation for Innovative Research Groups, the National Natural Science Foundation of China(41621091); the National Natural Science Foundation of China(41574072); Scientific Research Project of Hebei Education Department(16275435).

**引文格式:** TIAN Gui'e, CHEN Xiaodong, WU Shuqing, et al. Correction of Measured Gravity Tides with FG5 Absolute Gravimeter Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(6): 870-878. DOI: 10.13203/j.whugis20180472 (田桂娥, 陈晓东, 吴书清, 等. FG5绝对重力仪观测数据的实测重力潮汐改正[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(6): 870-878. DOI: 10.13203/j.whugis20180472)