第 29 卷　第 5 期　　地　震　学　报　　Vol. 29, No. 5
2007 年 9 月　(492～499)　　ACTA SEISMOLOGICA SINICA　　Sep., 2007

文章编号： 0253-3782(2007)05-0492-08

三峡水库首区重力固体潮观测资料分析*

陈晓东[1,2,3),♣]　孙和平[1,2)]　胡国庆[4)]　项大鹏[4)]
郝兴华[1)]　刘　明[1)]　张传中[4)]　袁　曲[4)]

1) 中国武汉 430077 中国科学院测量与地球物理研究所
2) 中国武汉 430077 中国科学院动力大地测量学重点实验室
3) 中国北京 100049 中国科学院研究生院
4) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

摘要　介绍了中国科学院测量与地球物理研究所的 LCR-ET20 重力仪和中国地震局地震研究所的 DZW-9 重力仪在三峡水库首区的重力固体潮比对观测. 获得了该地区高精度的重力固体潮潮汐参数，估算了 DZW-9 重力仪的格值，其值为 $(-756.06\pm0.05)\times10^{-8}(\mathrm{m\cdot s^{-2}})/\mathrm{V}$. 分析了相应仪器的重力观测残差，数值结果表明 DZW-9 重力仪的长期漂移具有线性特征，观测精度与 LCR-ET20 重力仪在同一量级. 本文提供的相关结果可为该地区地表和空间大地测量观测提供有效的重力潮汐改正模型.

关键词　三峡水库首区　重力潮汐观测　潮汐重力仪比对
中图分类号： P312.4　　**文献标识码：** A

引言

研究表明地球是一个受各种力作用的复杂运动体，地球上(或地球内部)的任何一点除了受到地球本身总质量的吸引力和地球自转离心力的合力(即重力)的作用外，还受日月等天体的引潮力作用. 在引潮力的作用下，地球的固体部分也会像海潮一样发生周期性的变化，通常将这种现象称为地球固体潮. 固体潮的存在将引起各种地球物理场变化，包括重力、倾斜、应变和地表位移等. 随着电子技术和计算机技术的发展，当今许多高精度的大地测量和地球物理研究中，固体潮影响已不容忽略，必须实施固体潮改正以便获得高精度的测量结果. 例如，绝对重力测量、GPS 观测、精密水准测量等(王勇，2003；许大欣，1998；王秀文，张锦，1991). 常规的地表观测技术采用理论模拟结果实施重力固体潮改正，但由于受诸如地质环境、地下水、大气和海洋等全球和区域因素的影响，理论改正已不能满足高精度观测要求，开展台站观测得到实测模型是解决该问题的有效途径.

我国三峡水库工程为研究重力场变化提供了良好契机. 从物理学角度来看，最关键是蓄水引起的各种地球物理场变化. 该水库从 2003 年开始蓄水，计划至 2009 年其蓄水水位

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-133)和国家自然科学基金面上项目(40404005，40574034)联合资助.
2007-01-26 收到初稿，2007-07-26 决定采用修改稿.
♣ 通讯作者. e-mail：chenxd@asch.whigg.ac.cn

http://www.dizhenxb.org.cn

达 175 m，库容量达 40 km^3(Boy，Chao，2003)．如此巨大量的水体积聚，意味着在该地区放置了一个十分巨大质量块，这将引起地球表面质量的重新分布，打破该地区原有的受力平衡状态．理论研究表明在三峡水库蓄水后，该地区的重力场、大地水准面、垂线偏差、高程和高差等均有明显变化(张克非等，1994；Wang，2000)．另外，三峡水库蓄水也会引起滑坡、地震和重力侵蚀等灾害性现象(丁多文等，1996；蒋福珍，2003；杨森楠，任建业，1997)．为了对三峡水库地区的各种形变进行监测，中国长江三峡工程总公司、中国地震局地震研究所和长江水利委员会综合勘测局联合布设了“长江三峡工程地壳形变监测网”．该网综合利用了各种高精度观测技术，如精密重力测量、精密水准测量、GPS、InSAR 等(邢灿飞等，2003)．本文主要介绍了 2005 年 6 月到 2006 年 7 月三峡水库首区重力固体潮观测结果．其主要目的是确定三峡水库首区的重力潮汐参数，为库区大地测量观测提供精确的重力潮汐改正模型．另外实施仪器比对，比较不同仪器的观测精度，获得我国生产的 DZW-9 重力仪的格值．

本文首先介绍观测台站、仪器和获得数据的基本情况，讨论获得重力仪格值的方法和结果；然后对观测数据进行调和分析，得到不同仪器的潮汐参数及其精度；最后分析了观测重力残差．

1　数据预处理和仪器标定

1.1　观测仪器和观测数据概述

观测所用的潮汐重力仪器安装在湖北省地震局宜昌中心地震台(图 1)，观测基墩与基岩稳固连接．2005年6月，LCR-ET20重力仪成功安装在与DZW-9重力仪同一基墩上，实现了两仪器的同址观测．

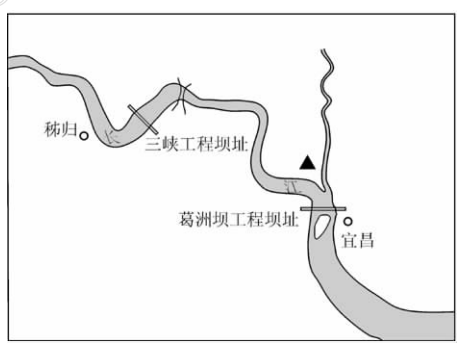

图 1　宜昌中心地震台位置(▲)示意图

LCR-ET20 重力仪是 1981 年由中国科学院测量与地球物理研究所从美国引进的，属于机械反馈式弹簧型重力仪．通过与德国 Darmstadt 大学物理大地测量研究所技术人员合作，1989 年安装了静电反馈系统和基于 DOS 操作的数字采集系统(Becker *et al*，1990)．2000 年安装了基于 Windows 系统的数字采集系统．同时还更换了 A/D 转换器等外设，使仪器在软硬件方面都得到更新(刘明等，2002)．通过设置，数据采集系统自动记录采样率为 1 s 的重力观测值，分辨率为 0.01 mV．为能有效记录重力场时间变化，我们设定的仪器输出线性量程范围为±4 V，一旦记录信号超过设定范围，仪器将自动调整零位，保证仪器输出在设定的线性量程范围内．

DZW-9 重力仪是由中国地震局地震研究所于 1985 年独立研制成功的高精度重力仪，属于垂直悬挂式弹簧型仪器，该仪器填补了我国重力固体潮观测仪器生产的空白．DZW-9 安装数字记录采集系统，记录的采样率为 1 秒．仪器的各项指标包括噪声水平、分辨率、线性度、动态范围均经过严格的测试，达到了设计要求．良好的高精度控温系统，保证了该类仪器的观测精度达到 10^{-8} m·s^{-2}．另外仪器摆位移精度高达 10^{-10} m，内温月变化小于

0.0001℃. 初步的标定和测试表明仪器的分辨率达到 10^{-8} m·s^{-2}，环境温度变化的影响小于 3.3×10^{-8}(m·s^{-2})/℃，测量范围是 2×10^{-5}m·s^{-2}.

原始记录采用的是不同时间系统，LCR-ET20 为世界时(UTC)，而 DZW-9 重力仪用的是北京时间(BJ). 在数据整理和资料预处理过程中统一使用了 UTC 系统. LCR-ET20 的观测时间段从 2005 年 6 月 14 日 1 时 10 分到 2006 年 5 月 18 日 12 时 7 分，去掉中间的一个大间断(从 2005 年 11 月 1 日 0 时 44 分到 2005 年 12 月 16 日 2 时 37 分，共 45 天 1 小时 53 分)，共 338 天 10 小时 59 分(图 2a). DZW-9 观测数据没有间断，所用数据从 2006 年 1 月 1 日 0 时 0 分到 2006 年 7 月 5 日 23 时 59 分，共 185 天 23 小时 59 分(图 2b). 另外，LCR-ET20 重力仪在 2006 年 3 月 27 日 0 时 59 分 59 秒发生了 1 小时偏移，将在数据预处理中得到有效解决.

1.2 数据预处理

通常数据采集系统每天自动提供一个数据记录文件，数据处理的第一件事是将每天的数据文件连起来组成连续的数据文件. 我们编写的数据预处理程序自动读取每天的数据，并自动将间断观测以缺省值 9999.000 补齐. 程序已对 LCR-ET20 输出量实施标定处理，得到的曲线单位是重力单位(10^{-9} m·s^{-2})，而由于未对 DZW-9 的输出量作标定处理，因此得到的曲线单位是电压单位(mV).

采用国际地潮中心推荐的 Tsoft 预处理软件对观测曲线中的尖峰、地震、掉格等干扰信号进行了手工修正，对较短的记录中断用三次多项式进行插值填补，保留长时间中断(实际上资料处理中，仅保留 LCR-ET20 的一个中断)(Vauterin，1998；陈晓东，孙和平，2002). LCR-ET20 重力仪修正后的观测数据如图 2a 所示，可直接用于后续的调和分析. 经干扰修正后的未经标定的 DZW-9 重力仪观测数据如图 2b 所示，可用于后续的仪器格值标定. 有了仪器格值后即可对未修正的数据进行重力变化计算，获得重力曲线，并重新实施各种干扰改正，以获得调和分析所需的数据. 由图 2 可知，两台仪器的长期漂移(长期的周期和非周期性变化)特征相差甚远，分析比较说明 DZW-9 重力仪的长期漂移要比 LCR-ET20 重力仪的长期漂移大得多.

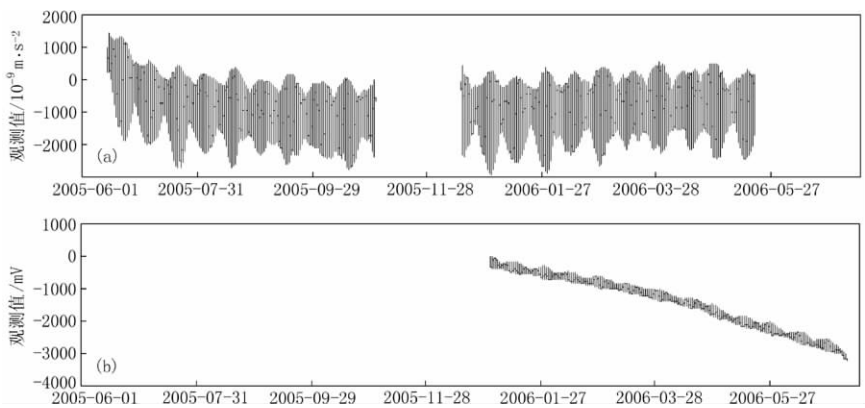

图 2 经 Tsoft 软件预处理后采样率为 1 分钟 LCR-ET20 重力仪(a)和 DZW-9 重力仪(b)的观测曲线

http://www.dizhenxb.org.cn

1.3　DZW-9 重力仪器格值的计算

利用同址比对观测方法获得重力仪的格值是一种精度高且操作简便的方法(Francis，1997；孙和平等，2001；陈晓东，孙和平，2003). 理论研究表明同址观测中不同重力仪获得的重力变化应该是一致的，如果我们已知其中的一台仪器格值，则其它重力仪的格值就可容易求得. 我们曾对 LCR-ET20 重力仪的性能作过系统研究，基于“读数轮法”(孙和平等，2006)，也曾在武昌国际重力潮汐基准站成功实施过标定. 安装在宜昌地震中心站后，我们也做过一次标定，获得的格值为 $42.8449\times10^{-8}(\mathrm{m\cdot s^{-2}})/\mathrm{V}$，与在武昌国际潮汐基准站获得的结果一致，这说明该仪器的格值稳定，其标定结果可用于对其它仪器的标定. 另外,DZW重力仪在研制的试验阶段也曾利用武昌理论潮汐参数作过初步的标定，得到了初步的格值是 $755.0\times10^{-8}(\mathrm{m\cdot s^{-2}})/\mathrm{V}$.

要作标定必须选择同时段的观测，我们选择的时段是从 2006 年 1 月 1 日 0 时 0 分到 2006 年 5 月 18 日 12 时 7 分，共 138 天 12 小时 7 分钟. 计算格值用的观测数据是经干扰修正后的数据. 如仔细修正掉格(记录值突然增大或减小)十分重要，否则掉格的累积将影响长期漂移，最终影响格值的计算. 为避免长期漂移影响标定格值，在实施两条曲线的回归计算之前，在时域内分别对修正后的观测数据进行最小二乘带通滤波，取 0.5～4.0 cpd(cycle per day)潮汐频段的观测数据，窗宽为 1 500 点. 结果说明这样处理十分有效，滤波后的两组观测数据呈现较好的线性关系(图 3). 对这两组滤波后的数据实施线性回归，得到的 DZW-9 重力仪的格值是 $(-756.06\pm0.05)\times10^{-8}(\mathrm{m\cdot s^{-2}})/\mathrm{V}$.

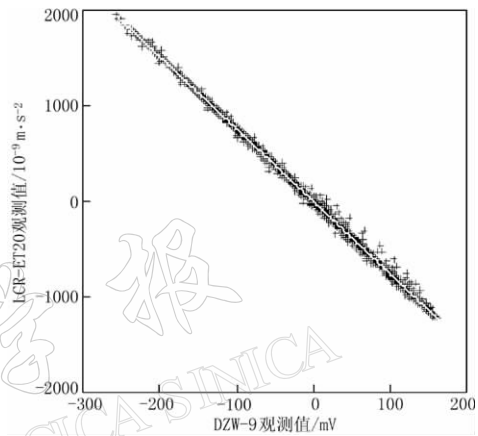

图 3　滤波后数据的线性关系

2　调和分析结果和重力残差分析

2.1　调和分析结果

为得到高精度重力潮汐参数，我们采用国际地潮中心推荐的标准调和分析方法和 Eterna33 计算软件. 这是国际上第一个分析精度能达到 $10^{-11}\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$ 的潮汐数据调和分析软件(Wenzel，1996). 为适应该软件数据格式和采样率要求，首先将 1 分钟的采样数据用滤波的方法转换成 1 小时采样数据. 为方便比较，两组数据分析时所用的参数相同，波群分组相同，引潮位展开表也相同(Tamura，1987). 分析结果由表 1 给出，要说明的是由于提前未做气压和海潮效应改正，表 1 中提供的潮汐参数中含有大气和海潮负荷的影响.

由表 1 可知，两台仪器都获得了高精度的潮汐参数. 就 LCR-ET20 重力仪而言，O_1 波振幅因子精度达到 0.00254，相对精度约为千分之二，相位滞后精度为 0.1227°；M_2 波振幅因子精度为 0.00090，相对精度约为万分之七，相位滞后精度为 0.0439°. 对 DZW-9 重力仪来说，O_1 波振幅因子精度为 0.00120，相对精度约为千分之一，相位滞后精度为 0.0579°；M_2 波振幅因子精度为 0.00039，相对精度约为万分之三，相位滞后精度为 0.0192°. 比较不同仪器相同波群的潮汐参数可发现，无论是振幅因子还是相位滞后都不完

全相同. 分析表明引起这些差异的主要原因有：① 不同的仪器长周期漂移特征；②不同的观测间断情况；③ 数据采集系统设置的采样率不同；④ 没有进行独立的仪器相位滞后标定；⑤ 仪器输出是否采用温度改正.

表 1 LCR-ET20 重力仪和 DZW-9 重力仪的调和分析结果

起始频率/cpd	终止频率/cpd	理论振幅/(10^{-9} m·s^{-2})	波群名	LCR-ET20 重力仪		DZW-9 重力仪	
				振幅因子及其精度	相位滞后及其精度/°	振幅因子及其精度	相位滞后及其精度/°
0.501370	0.911390	52.0745	Q_1	1.18640±0.01080	−0.7016±0.5218	1.17862±0.00551	−0.0223±0.2677
0.911391	0.947991	271.9826	O_1	1.18548±0.00254	−0.3681±0.1227	1.18405±0.00120	−0.4963±0.0579
0.947992	0.981854	21.3904	M_1	1.17544±0.02491	−0.1920±1.2140	1.18251±0.01138	−0.5919±0.5515
0.981855	0.998631	126.5529	P_1	1.18030±0.00893	0.3480±0.4334	1.19012±0.00369	−0.2313±0.1778
0.998632	1.023622	382.5129	K_1	1.14937±0.00261	−0.3043±0.1301	1.15477±0.00108	−0.4172±0.0535
1.023623	1.057485	21.3896	J_1	1.15468±0.02975	−1.6758±1.4763	1.18961±0.01520	−0.5602±0.7322
1.057486	1.470243	11.7040	OO_1	1.20457±0.03288	−1.7080±1.5637	1.18329±0.01490	−0.0856±0.7214
1.470244	1.880264	17.0040	$2N_2$	1.19618±0.01773	−0.1461±0.8491	1.18204±0.00885	−0.2315±0.4291
1.880265	1.914128	106.4778	N_2	1.17548±0.00430	−0.3641±0.2096	1.17633±0.00200	−0.3685±0.0972
1.914129	1.950419	556.1353	M_2	1.17441±0.00090	−0.4602±0.0439	1.17362±0.00039	−0.3855±0.0192
1.950420	1.984282	15.7193	L_2	1.16300±0.02102	−1.9629±1.0357	1.14914±0.01269	0.5543±0.6327
1.984283	2.002736	258.7434	S_2	1.20325±0.00242	0.9008±0.1150	1.17504±0.00092	0.1800±0.0449
2.002737	2.451943	70.3397	K_2	1.16126±0.00674	−0.9986±0.3326	1.17480±0.00258	−0.2109±0.1260
2.451944	7.000000	9.4016	M_3M_6	1.07992±0.02266	0.5958±1.2023	1.09942±0.01266	−0.1396±0.6598

2.2 重力合成潮和残差分析

利用表 1 中的数值结果，我们计算了 2006 年 1 月 1 日到 2006 年 6 月 30 日重力合成潮(采样率为 1 分钟)，并在时间域中研究两者差异(图 4). 由图 4c 可知，两台仪器获得的重力潮汐合成潮间的差异较小. 由于两台仪器观测精度均为 10^{-8} m·s^{-2}，所以确定的重力合成潮之差在 $\pm 2\times 10^{-8}$ m·s^{-2} 是合理的，说明两台仪器得到的合成潮具有良好的一致性.

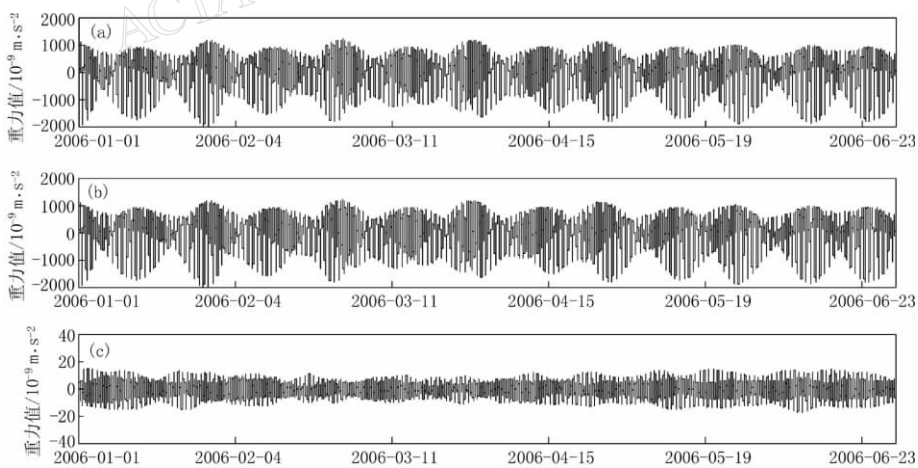

图 4 LCR-ET20 重力仪(a)、DZW-9 重力仪(b)重力合成潮的比较和两者的差(c)

在获得合成潮后，就可分别用观测数据减去各自的合成潮获得重力观测残差，以更深入研究观测数据的长期漂移和台站背景噪声. 首先我们采用时域内的最小二乘低通滤波方法得到长期漂移曲线，采用的截止频率 0.2 cpd，窗宽 72 点. LCR-ET20 重力仪和 DZW-9

重力仪的重力残差、滤波得到的长期漂移和去掉长期漂移后的重力残差分别如图 5 和图 6 所示. 从图 5 和图 6 可以看出，虽然 DZW-9 重力仪的长期漂移要比 LCR-ET20 重力仪的约大一个量级，但该仪器呈现出线性特征，这意味着我们可以很好模拟，并将其消除，这对估算潮汐参数的影响较小；而 LCR-ET20 重力仪的长期漂移特征比较复杂，不能有效地将其消除，对于估算潮汐参数，特别是长周期波的潮汐参数的影响较大. 另外，比较去掉长期漂移的重力残差可以看出，LCR-ET20 和 DZW-9 的重力残差均约在 $\pm 100\times10^{-9}$ $m\cdot s^{-2}$ 之内，这说明两台仪器的观测精度在同一量级上.

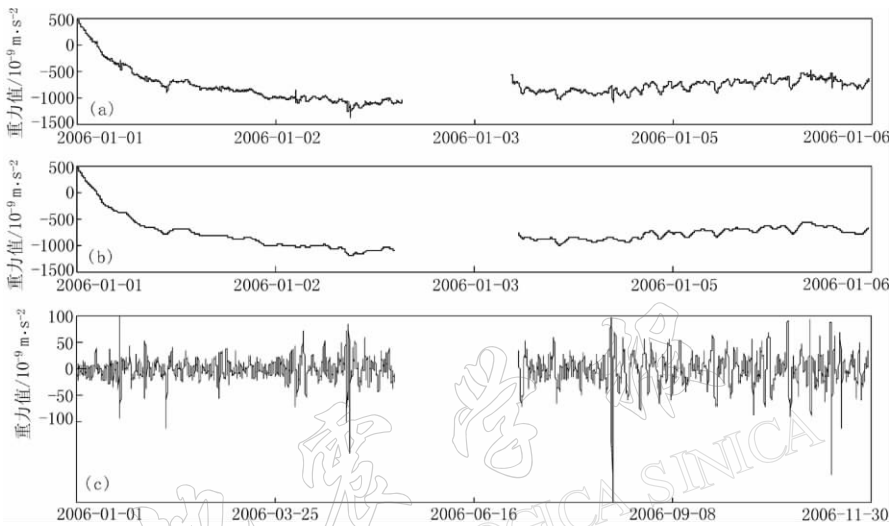

图 5　LCR-ET20 重力仪的重力残差(a)、滤波得到的长期漂移(b)和去掉长期漂移项后的重力残差(c)

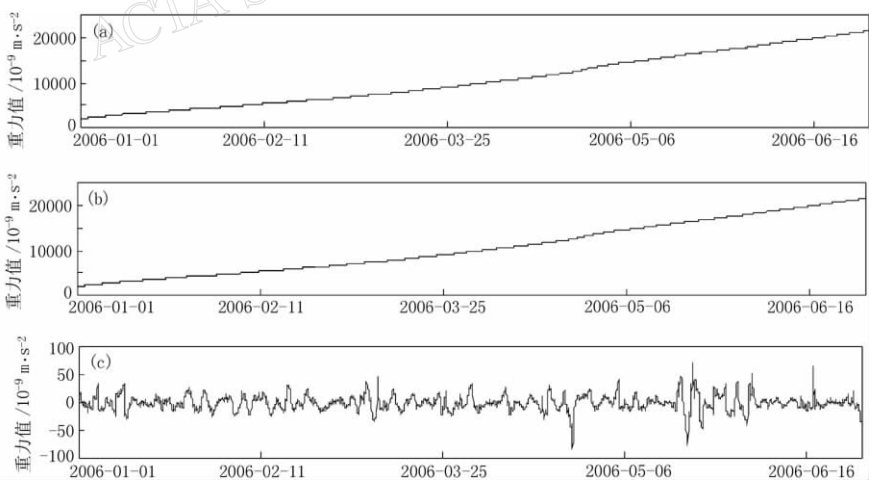

图 6　DZW-9 重力仪的重力残差(a)、滤波得到的长期漂移(b)和去掉长期漂移项后的重力残差(c)

为了在频域内研究重力残差，我们分别对图 5a 和图 6a 的结果做了谱分析，结果分别如图 7a，b 所示. 为了能较好显示潮汐频段内的能量，长期部分的振幅作了截断处理. 由

图 7 可知，两台仪器的重力残差中绝大部分能量集中在长周期频段，LCR-ET20 重力仪重力残差的振幅谱在周日和半日频段上还有能量存在，周日频段的振幅约为 5×10^{-9} $m\cdot s^{-2}$，半日频段的振幅约为 $2\times10^{-9}m\cdot s^{-2}$，而 DZW-9 重力仪重力残差的振幅谱在周日和半日以及频率更高频段上几乎没有能量存在，这说明不同仪器在相应频段响应间的差异.

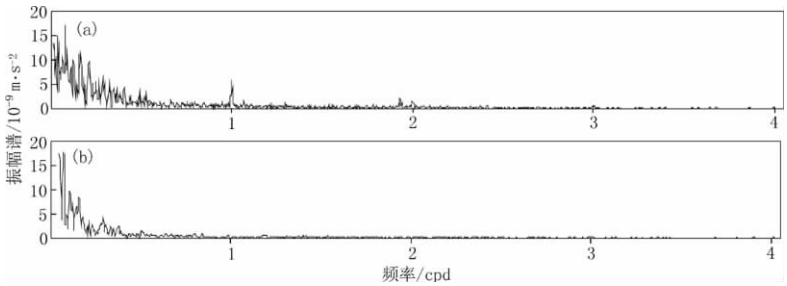

图 7 LCR-ET20 和 DZW-9 重力仪重力残差的振幅谱

3 结论

通过 LCR-ET20 重力仪共 338 天和 DZW-9 重力仪共 185 天在三峡水库首区的同址观测，成功地获得了高精度重力潮汐参数，数值结果显示两台仪器的观测精度在同一量级，说明由我国自行研制的重力潮汐观测仪器达到了一个新水平. 我们实施了用 LCR-ET20 对 DZW-9 的格值标定，获得了格值为$(-756.06\pm0.05)\times10^{-8}(m\cdot s^{-2})/V$. 分析了观测重力残差，研究了台站背景噪音等因素，数值结果说明两台仪器都有较大的长期漂移，但 DZW-9 呈现出线性特征. 本文提供的结果可为该地区地表和空间大地测量的重力潮汐改正提供有效参考.

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA

参 考 文 献

陈晓东，孙和平. 2002. 一种新的重力潮汐数据预处理和分析方法[J]. 大地测量与地球动力学，**22**(3)：83-87.

陈晓东，孙和平. 2003. 用 GWR-C032 超导重力仪观测资料实施对 LCR-ET20 型重力仪的精密标定[J]. 测绘学报，**32**(3)：219-223.

丁多文，白世伟，刘泉声，等. 1996. 三峡库区重力侵蚀特征及其对重要城市地质环境影响评价[J]. 中国地质大学学报(地球学报)，**21**(1)：108-111.

蒋福珍. 2003. 重力测量在三峡库区形变监测中的作用[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，**28**(6)：679-682.

刘明，孙和平，郑少怀，等. 2002. 基于虚拟仪器的 LaCoste-Romberg ET 型重力仪数据采集和显示系统[J]. 电子测量技术，**6**：38-40.

孙和平，陈晓东，许厚泽，等. 2001. GWR 超导重力仪潮汐观测标定因子的精密测定[J]. 地震学报，**23**(6)：651-658.

孙和平，许厚泽，陈武，等. 2006. 香港地区重力固体潮和海潮负荷特征研究[J]. 地球物理学报，**49**(3)：724-734.

王秀文，张锦. 1991. 精密水准测量中地球潮汐改正的实用计算公式及其精度估计[J]. 山西矿业学院学报，**9**(1)：91-98.

王勇. 2003. 绝对重力观测的潮汐改正[J]. 大地测量与地球动力学，**23**(2)：65-68.

邢灿飞，龚凯虹，杜瑞林. 2003. 长江三峡工程地壳形变监测网络[J]. 大地测量与地球动力学，**23**(1)：114-118.

许大欣. 1998. GPS 测站的海洋潮汐改正[J]. 地壳形变与地震，**18**(3)：32-35.

杨森楠，任建业. 1997. 长江三峡狮子口重力滑动构造[J]. 地质学报，**71**(1)：27-35.

张克非，边少锋，陶本藻. 1994. 三峡水库的建立对库区地球重力场及地壳形变的影响[J]. 地球物理学报，**37**(2)：260-

267.

Boy J P, Chao B F. 2003. 中国三峡水库蓄水期间随时间变化的重力信号[J]. 世界地震译丛，(6)：42-47.

Becker E, Groten E, 陶国祥，等. 1990. ET 型潮汐重力仪的改进[J]. 测绘学报，**19**(3)：229-235.

Francis O. 1997. Calibration of the C021 Superconducting gravimeter in Membach (Belgium) using 47 days of absolute gravity measurements[C]// *Proc International Association of Geodesy Symposia in Gravity, Geoid and Marine Geodesy*. Berlin: Springer Verlag, **117**: 212-219.

Tamura Y. 1987. A harmonic development of the tide-generating potential[J]. *Bulletin d'Information de Marees Terrestres*, **99**: 6 813-6 855.

Vauterin P. 1998. Tsoft: Graphical and interactive software for the analysis of earth tide data[C]// *Proceeding of 13th International Symposium on Earth Tides*. Brussels: Royal Observatory of Belgium: 481-486.

Wang H S. 2000. Surface vertical displacements and level plane changes in the front reservoir area caused by filling the Three Gorges Reservoir[J]. *J Geophy Res*, **105**(B6): 13 211-13 220.

Wenzel H G. 1996. The nanogal software: Earth tide data processing package Eterna3.30[J]. *Bulletin d'Information de Marees Terrestres*, **124**: 9 425-9 439.

ANALYSIS OF THE TIDAL GRAVITY OBSERVATIONS IN THREE GORGES RESERVOIR AREA

Chen Xiaodong[1,2,3)]　Sun Heping[1,2)]　Hu Guoqing[4)]　Xiang Dapeng[4)]
Hao Xinghua[1)]　Liu Ming[1)]　Zhang Chuanzhong[4)]　Yuan Qu[4)]

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

2) *Key Laboratory of Dynamical Geodesy, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430077, *China*

3) *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

4) *Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan* 430071, *China*

Abstract: The comparative observations of the tidal gravity in Three Gorges reservoir area, recorded with the LCR-ET20 gravimeter from Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences and the DZW-9 gravimeter from Institute of Seismology, China Earthquake Administration, are introduced in the paper. High-accuracy tidal gravity parameters in this area are obtained, and the scale factor of the DZW-9 gravimeter is also estimated at a value of $(-756.06\pm0.05)\times10^{-8}(\mathrm{m\cdot s^{-2}})/\mathrm{V}$. The observed residuals of the corresponding instruments are investigated. Numerical results indicate that the long-term drift of the DZW-9 gravimeter appears a linear characteristic, and the observed accuracy is of the same order comparing with that of the LCR-ET20 gravimeter. The results given in the paper can provide with an effective reference model of the tidal gravity correction to the ground based and space geodesy.

Key words: Three Gorges reservoir area; tidal gravity observation; comparison of the tidal gravimeters

http://www.dizhenxb.org.cn