

福建地区综合场地水准、重力及 GPS 资料的处理分析^{* 1}

周红伟¹⁾ 卢至孟²⁾ 何万平¹⁾ 占 惠¹⁾ 陈新泽¹⁾

(¹⁾ 厦门地震勘测研究中心, 厦门 361021
(²⁾ 同致电子科技(厦门)有限公司, 厦门 361009)

摘 要 利用福清、泉州综合场地的水准复测资料, 对该地区的重力复测资料进行地形变模型校正, 得到大部分测点地形变影响量级 $\leq 10 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$; GPS 资料的处理结果表明, 跨综合场地的三组断层由东向西运动逐渐减弱, 其运动速率与华南块体的整体运动速率一致。

关键词 综合场地; 流动重力测量; 水准; 地形变; GPS

中图分类号: P315.72⁺⁶

文献表示码: A

PROCESSING ANALYSIS OF LEVELING, GRAVITY AND GPS DATA OF COMPREHENSIVE SITE IN FUJIAN AREA

Zhou Hongwei¹⁾, Lu Zhimeng²⁾, He Wanping¹⁾, Zhan Hui¹⁾ and Chen Xinze¹⁾

(¹⁾ Xiamen Research Center of Seismology Survey, Xiamen 361021
(²⁾ Tung Thih Electronic(Xiamen) Limited Company, Xiamen 361009)

Abstract Using the leveling repetition data of Fuqing and Quanzhou comprehensive sites, the crustal deformation of the regional repetition gravity data was corrected, the magnitude order of that effect is less than $10 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$. The processing results of GPS data show that the movement of three groups of faults across the comprehensive site decreased gradually from east to west, the movement velocity is the same as the southern China block.

Key words: comprehensive site; repeated gravity measurements; leveling; crustal deformation; GPS

1 引言

为保障对地震重点危险区断裂运动特征的监测, 在主要断裂带附近建设大跨度、测点密集的流动观测阵列, 综合 GPS、重力、精密水准观测技术, 监测主要断裂重要部位的构造运动特征, 研究观测阵列数据综合处理方法, 分析断裂带及其两侧形变场、重力场的空间分布, 探测断裂运动状态与闭锁段的时空分布, 并探寻可能的地震前兆信息。

重力异常反映地壳浅部及深部的地质构造, 它

包括因地下密度不均匀的地质体引起的异常, 也包含测点周围地形、所处纬度等因素的影响。本文结合合同点位地形起伏变化探讨了地形变与重力变化关系, 研究其影响量级, 通过重力异常特征结合 GPS 处理结果分析综合场地断裂带的构造运动等物理特征。

2 资料概括

从 2008 年起, 跨长诏断裂带布设了福清、泉州两处跨断裂综合观测场地, 进行 GPS 剖面、重力剖

* 收稿日期: 2013-01-11

基金项目: 厦门地震勘测研究中心基金(2011)

作者简介: 周红伟, 女, 1982 年生, 工程师, 主要研究方向为重力数据处理分析及地震监测预报。E-mail: zhouhongwei527@163.com

面和水准剖面综合观测。

福清跨断层综合观测场地由 10 个 GPS 测点、10 个流动重力测点、20 个水准测点构成,总长约 75 km(图 1(a))。自北西至南东分别跨越北东走向的东张断裂与平原-东山澳角断裂。

泉州跨断层综合观测场地跨越东张-诏安断裂带中的李西-东田北东向断裂和长乐-东山断裂带中的罗裳山-灵源山北东向断裂,由 10 个 GPS 测点、10 个流动重力测点、20 个水准测点构成,总长约 75 km(图 1(b))。

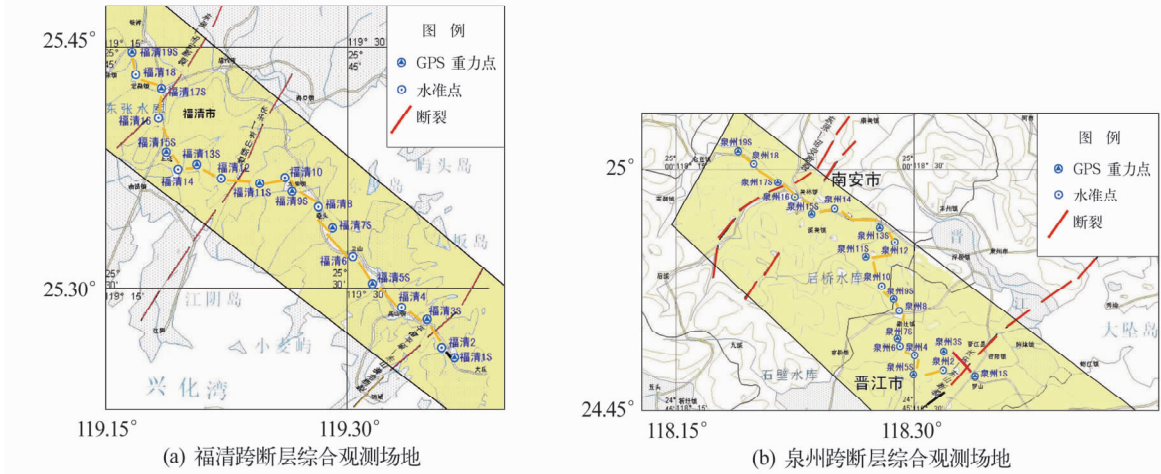


图 1 福建综合观测场地分布
Fig. 1 Distribution of comprehensive sites in Fujian area

3 地形变校正

福清、泉州两个综合跨断层场地分别于 2009、2010、2011 年的 9—10 月进行了水准测量,至今已有三期复测资料,两个场地的流动重力观测在 2009 年的 7 和 10 月、2010 和 2011 年的 7 月进行,至今共有四期复测资料。分别对两个场地共 19 个测点的水准资料和重力资料进行处理分析^[1,2],得到各点的高程年变化和重力年变化如图 2 所示。

图 2 中实线表示 2011 年 7 月相对于 2010 年 7 月复测的年变化值,虚线表示 2010 年 7 月相对于 2009 年 7 月的年变化值。由图 2 可知,各测点的高程年变化和重力年变化幅度均不大,高程年变化幅值为 $\pm 20\text{ mm}$,而重力年变化为 $\pm 40 \times 10^{-8}\text{ m/s}^2$,且两个场地的高程年变化与重力年变化呈负相关性。需要说明的是图中各变化值,我们进行了自由空气校正和地形校正^[3]。

表 1、2 给出了两个综合场地校正前后的重力点值的变化。由表 1、2 可知,除福清场地的 15 号测点 2010 年地形变校正量超过 $20 \times 10^{-8}\text{ ms}^{-2}$ 外,福清场地、泉州场地因地形变引起的重力变化量均小于 $10 \times 10^{-8}\text{ ms}^{-2}$ 。经地形变校正后,泉州场地的泉州 5S 至泉州 15S 共 6 个测点 2010 年地形变校正后重力年变化均出现同步增加,而这些测点 2011 年重力年变化量值和其他测点的重力年变化量值均明显减少。经地形变校正后福清场地的重力年变化比泉州

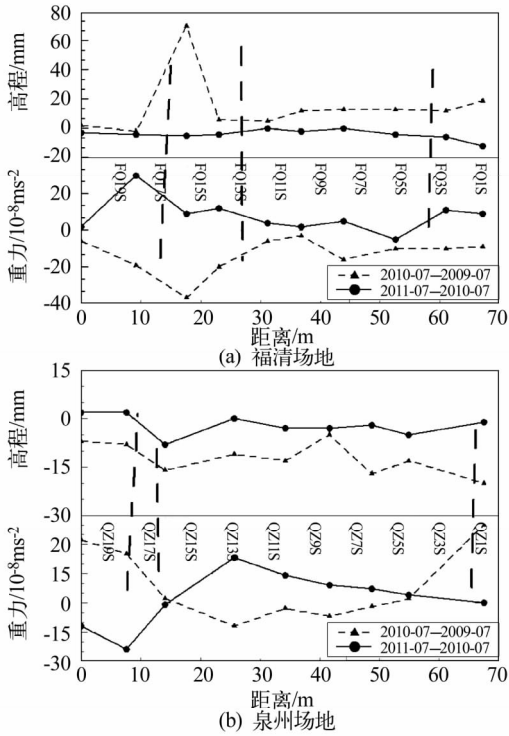


图 2 测点高程年变化和重力点值年变化
Fig. 2 Vertical deformation annual change and gravity annual change at measuring points

场地的重力年变化更小,大部分测点重力年变化在 $10 \times 10^{-8}\text{ ms}^{-2}/\text{a}$ 以内,其中变化较大的只有福清场地的福清 17S 测点、泉州场地泉州 13S 测点和泉州 17S 测点,其年变化超过 $20 \times 10^{-8}\text{ ms}^{-2}$ 。

表 1 福清场地校正前后重力点值变化

Tab. 1 Gravity point value changes before and after correction in Fuqing site

点号	2010 年复测年变化				2011 年复测年变化			
	重力	高程	地形变	校正后	重力	高程	地形变	校正后
	变化	变化	校正量	重力变化	变化	变化	校正量	重力变化
	(10 ⁻⁸	(mm)	(mm)	(10 ⁻⁸	(10 ⁻⁸	(mm)	(mm)	(10 ⁻⁸
	ms ⁻²)			ms ⁻²)	ms ⁻²)			ms ⁻²)
FQ1S	-9	19	-6	-3	9	-12	4	5
FQ3S	-10	12	-4	-6	11	-6	2	9
FQ5S	-10	13	-4	-6	-5	-4	1	-6
FQ7S	-16	13	-4	-12	5	0	0	5
FQ9S	-3	12	-4	1	2	-2	1	1
FQ11S	-6	5	-2	-4	4	0	0	4
FQ13S	-20	6	-2	-18	12	-4	1	11
FQ15S	-37	70	-22	-15	9	-5	2	7
FQ17S	-19	-2	1	-20	30	-4	1	29
FQ19S	-6	2	-1	-5	2	-3	1	1
相关系数	$\rho = -0.734\ 9$				$\rho = -0.208\ 0$			

表 2 泉州场地校正前后重力点值变化

Tab. 2 Gravity point value changes before and after correction in Quanzhou site

点号	2010 年复测年变化				2011 年复测年变化			
	重力	高程	地形变	校正后	重力	高程	地形变	校正后
	变化	变化	校正量	重力变化	变化	变化	校正量	重力变化
	(10 ⁻⁸	(mm)	(mm)	(10 ⁻⁸	(10 ⁻⁸	(mm)	(mm)	(10 ⁻⁸
	ms ⁻²)			ms ⁻²)	ms ⁻²)			ms ⁻²)
QZ1S	40	-20	8	32	0	-1	0	0
QZ5S	2	-13	5	-3	4	-5	2	2
QZ7S	-2	-17	7	-9	7	-2	1	6
QZ9S	-7	-5	2	-9	9	-3	1	8
QZ11S	-3	-13	5	-8	14	-3	1	13
QZ13S	-12	-11	5	-17	23	0	0	23
QZ15S	2	-16	7	-5	-1	-8	3	-4
QZ17S	25	-8	3	22	-24	2	-1	-23
QZ19S	32	-7	3	29	-12	2	-1	-11
相关系数	$\rho = -0.140\ 5$				$\rho = -0.346\ 5$			

为进一步说明重力与形变的关系,由

$$\Delta g t = a + b \Delta H t \tag{1}$$

$$\rho = \frac{\sum \Delta g \Delta H - \frac{\sum \Delta g \sum \Delta H}{n}}{\sqrt{\left(\sum (\Delta g)^2 - \frac{(\sum \Delta g)^2}{n} \right) \left(\sum (\Delta H)^2 - \frac{(\sum \Delta H)^2}{n} \right)}} \tag{2}$$

计算得到两个场地的重力变化与高程变化的相关性为^[4]: 福清场地 $a = -7.119 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$, $b = -0.432\ 1 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$, 重力变化和高程变化的关系系数 $\rho = -0.011\ 5$; 泉州场地 $a = 0.477\ 5 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$, $b = -0.690\ 7 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$, 重力变化和高程变化的关系系数 $\rho = -0.004\ 4$ 。图 3 为福清、泉州场地重力变化、高程变化、自由空气梯度和布格梯度变化的比较。

由图 3 可知,其变化既不符合自由空气效应,也不符合布格效应,主要原因是周围环境的干扰。福

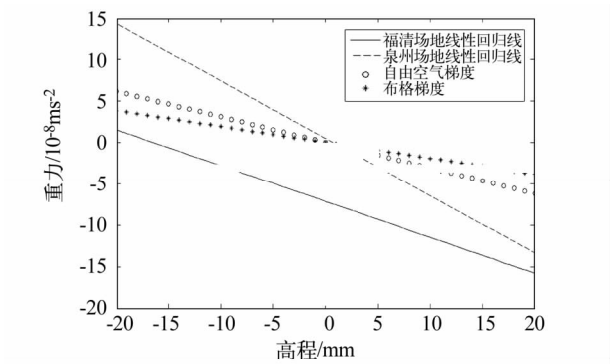


图 3 福清、泉州场地重力与高程之间的关系

Fig. 3 Relation between gravity and elevation in Fuqing and Quanzhou sites

清、泉州两个场地的重力与高程呈负相关性,且 2010 年复测中福清场地两者间的线性相关程度较高,泉州场地两者间的相关程度较低,泉州场地 2010 年复测结果表明,其中有 QZ7S、QZ9S、QZ11S、QZ13S 共 4 个测点重力与高程呈正相关性。

图 4 为经地形变校正后获得的两个场地的高程剖面图和完全布格重力剖面图,从图 4 可看出,两个场地中布格重力值分布与各点的高程走向不对应,且自东向西逐渐减少。

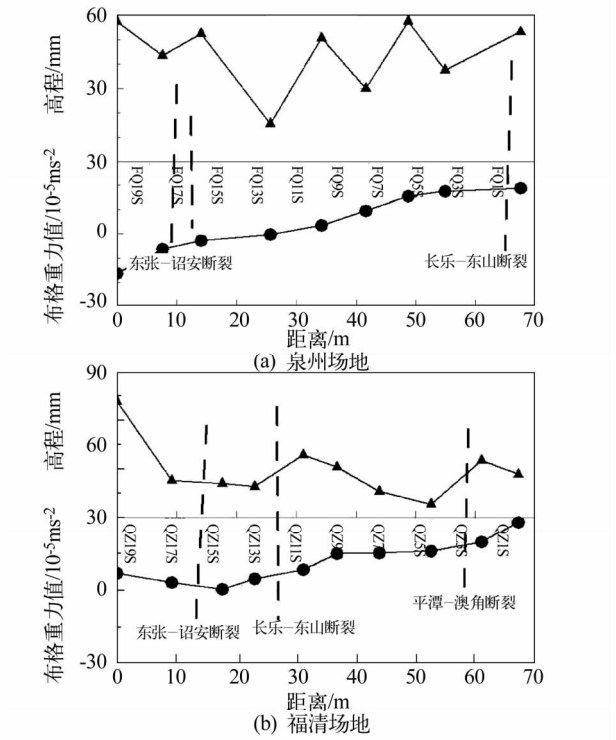


图 4 高程和布格重力剖面图

Fig. 4 Elevation and Bouguer gravity section view

4 GPS 计算结果分析

2009 年 10 月完成福清、泉州综合场地共 19 个 GPS 点第一期观测,2011 年 9 月完成了第二期观

测。选用 12 个 IGS 和国内的 GPS 跟踪站作为参考站,用 GAMIT/GLOBK 解算软件对综合场地 18 个 GPS 测站(FQ15S 点数据有问题)观测数据进行处理,经过基线解算和平差得到各站在 ITRF2000 坐标框架下南北向和东西向的形变速率见表 3。

表 3 福清、泉州场地 GPS 站速率表(单位:mm/a)

Tab.3 GPS sites' s velocity in Fuqing and Quanzhou comprehensive sites(unit: mm/a)

点名	V_N	V_E	V	点名	V_N	V_E	V
FQ1S	-13.07	33.20	35.68	QZ1S	-11.60	33.33	35.29
FQ3S	-10.85	31.67	33.48	QZ5S	-9.99	36.03	37.39
FQ5S	-16.97	31.81	36.05	QZ7S	-16.89	32.23	36.39
FQ7S	-8.69	32.83	33.96	QZ9S	-6.84	36.69	37.32
FQ9S	-12.90	32.87	35.31	QZ11S	-12.96	34.00	36.39
FQ11S	-12.51	32.14	34.49	QZ13S	-11.49	31.73	33.75
FQ13S	-10.63	34.12	35.74	QZ15S	-6.38	35.33	35.90
FQ17S	-14.77	37.08	39.91	QZ17S	-14.78	34.72	37.73
FQ19S	-14.91	31.76	35.09	QZ19S	-11.32	34.01	35.84

由表 3 可知,两个场地各 GPS 测点的运动速率与华南板块的整体运动速率(约 35 mm/a)相近^[5],泉州场地测点的运动速率比福清场测点运动速率变化更显著,其中 FQ17S、QZ5S、QZ9S、QZ13S、QZ17S、QZ19S、QZ1S 站的形变速相对显著,这与经地形变化校正后的各测点的重力年变化结果是相同的。

通过应变模型^[6]计算了 18 个 GPS 站上的最小最大主应变、第一剪应变、最大剪应变和面应变分布如表 4 所示。

由表 4 可知,福清场地和泉州场地各站的主应变均表现为压应变,面应变为负,由东向西应变参数逐渐减小,表明跨这两个场地的三组断裂均表现为压应变,且自东向西剪切和应变积累逐渐减弱。

表 4 福清、泉州场地 GPS 站应变参数(单位:10⁻⁹/a)

Tab.4 GPS sites' s strain parameters in Fuqing and Quanzhou sites(unit:10⁻⁹/a)

点名	最小主应变	最大主应变	第一剪应变	最大剪应变	面应变
FQ1S	-24.838	-8.344	-15.855	16.494	-33.182
FQ3S	-24.029	-8.441	-15.067	15.588	-32.470
FQ5S	-22.709	-8.353	-13.918	14.355	-31.062
FQ7S	-21.546	-8.486	-12.774	13.060	-30.032
FQ9S	-20.513	-8.481	-11.827	12.032	-28.994
FQ11S	-19.826	-8.335	-11.290	11.490	-28.161
FQ13S	-18.487	-8.091	-10.218	10.396	-26.577
FQ17S	-17.302	-8.351	-8.916	8.951	-25.653
FQ19S	-16.513	-8.376	-8.132	8.137	-24.890
QZ1S	-12.197	4.991	-8.005	17.187	-7.206
QZ5S	-11.370	5.390	-7.230	16.760	-5.979
QZ7S	-10.802	5.229	-6.635	16.031	-5.573
QZ9S	-10.373	4.903	-6.157	15.276	-5.470
QZ11S	-9.578	4.813	-5.329	14.391	-4.765
QZ13S	-9.521	4.418	-5.222	13.938	-5.103
QZ15S	-8.402	5.021	-4.119	13.423	-3.381
QZ17S	-7.628	5.132	-3.297	12.760	-2.495
QZ19S	-6.829	5.325	-2.434	12.154	-1.503

表 5 为用 GAMIT/GLOBK 解算软件获得的福清、泉州场地 GPS 测站基线变化。由表 5 可知,各基线的变化幅值较小(≤0.02 m),由东向西基线长经历挤压-拉长变化的过程,表明三组断裂由东向西挤压运动逐渐减弱。

表 5 福清、泉州场地 GPS 站基线长变化(单位:m)

Tab.5 GPS sites' s baseline change in Fuqing and Quanzhou sites(unit: m)

基线名	2009 年的基线长	2011 年的基线长	基线长变化量
FQ01_FQ03	5 252.36	5 252.35	-0.01
FQ01_FQ11	28 574.36	28 574.35	-0.01
FQ03_FQ13	29 932.30	29 932.31	0.01
FQ07_FQ13	15 907.37	15 907.38	0.01
FQ13_FQ17	9 539.89	9 539.90	0.01
FQ13_FQ19	14 519.71	14 519.72	0.01
FQ03_FQ17	38 441.71	38 441.73	0.02
QZ01_QZ15	25 195.39	25 195.38	-0.01
QZ07_QZ09	4 692.73	4 692.71	-0.02
QZ13_QZ17	12 020.59	12 020.60	0.01
QZ13_QZ19	17 290.36	17 290.37	0.01
QZ15_QZ17	5 193.37	5 193.38	0.01
QZ15_QZ19	10 564.57	10 564.58	0.01
QZ17_QZ19	5 380.39	5 380.38	-0.01

5 结论

福清、泉州综合场地的重力变化约为 ±40 × 10⁻⁸ms⁻²;高程变化速率为 ±10 mm。

经地形变校正后的各测点的重力变化和 GPS 形变速率结果表明,泉州场地运动较福清场地运动剧烈,跨综合场地的三组活动断裂运动自东向西逐渐减弱。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 王庆宾,吴晓平. 相对重力测量值的改正[J]. 测绘学院学报,2001,18(增刊):8-10.
- 3 李天生,等. 京津文霸地区重力复测成果的地形变地下水校正[J]. 地壳形变与地震,1990,(3):68-75.
- 4 吴雪芳,田世华. 重力变化与地壳形变、地下水关系的研究[J]. 地震学报,1992,14(增刊):653-661.
- 5 丁学仁,胡新康,刘序俨. 福建地区地块运动时空变化特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,2006,(2):58-61.
- 6 李延兴,等. 菲律宾海板块的整体旋转线性应变模型与板内形变-应变场[J]. 地球物理学报,2006,49(5):1 339-1 346.