

地震重力网经典平差与拟稳平差综合分析与研究

陈兆辉, 张双喜, 刘金钊, 张品, 朱传东

引用本文:

陈兆辉, 张双喜, 刘金钊, 等. 地震重力网经典平差与拟稳平差综合分析与研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11): 1693–1702.

CHEN Zhaohui, ZHANG Shuangxi, LIU Jinzhao, et al. Comprehensive Analysis and Research of Classic Adjustment and Quasi-Stable Adjustment in Mobile Gravity Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1693–1702.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[利用自适应水准网动态平差建立山东垂直运动速度模型](#)

Vertical Movement in Shandong Province Based on Adaptively Dynamic Adjustment for Level Network

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 620–625 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180296>

[尺度因子的MAD估计及其在测量平差中的应用](#)

MAD Estimate of Scale Factor and Its Applications in Measurement Adjustment

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1636–1640 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190166>

[高分七号卫星立体影像与激光测高数据联合区域网平差](#)

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1423–1430 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210417>

[不等式约束PEIV模型的经典最小二乘方法](#)

Classical Least Squares Method for Inequality Constrained PEIV Model

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1291–1297 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190196>

[附有相对权比的加权总体最小二乘联合平差方法](#)

Weighted Total Least Squares Method for Joint Adjustment Model with Weight Scaling Factor

武汉大学学报·信息科学版. 2019, 44(8): 1233–1240 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20170265>



地震重力网经典平差与拟稳平差综合分析与研究

陈兆辉¹ 张双喜¹ 刘金钊¹ 张 品¹ 朱传东¹

¹ 中国地震局第一监测中心,天津,300180

摘 要:基于南北地震带南段重力网2015—2016年的地震重力测量数据,对重力网经典平差和拟稳平差进行深入的分析,给出了相对重力仪一次项系数的评定方法,并基于重力点值变化及误差定义了两种定量参数化指标量 P 值和 R 值,为分析重力网点值变化的显著性程度提供定量依据。研究表明,经典平差和拟稳平差计算的2015—2016年重力网点值变化形态整体一致,但拟稳平差的指标量($P=0.55$)小于经典平差($P=1.70$);经典平差的起算基准与重力点值变化密切相关,在点值变化误差相同的前提下,不变基准的指标量($P=0.96$)小于时变基准的指标量($P=1.70$),降低了其反映的重力网点值变化的显著性程度;拟稳点决定了拟稳平差重力网点值变化的真实度,对平差结果至关重要。该研究结果可为地震重力网平差提供参考依据。

关键词:拟稳平差;经典平差;地震重力网

中图分类号:P315

文献标志码:A

地球重力场的空间异常特征和动态时间变化可为地球内部构造和动力学研究提供重要的基础信息。区域重力场与地壳运动、环境变化和深部物质运移等因素密切相关^[1-3]。随着重力观测仪精度的提高以及观测技术的不断发展,利用重力测量获得区域重力场随时间的非潮汐变化,成为研究地震孕育、发生和调整以及地球内部物质运移过程的重要方式^[4-6]。

以监测地壳运动及研究地震活动相关的重力场变化为目的,定期开展固定点位高精度重力重复测量的工作,称为地震重力测量或流动重力测量^[5]。重力测量的数据需经过平差获得各测点的重力值。其中,经典平差和拟稳平差是常用的两种地震重力网平差方法。经典平差以测网内已知重力值为起算基准;拟稳平差将测网中的重力点分为相对稳定和不稳定两部分,以相对稳定点的重心作为起算基准^[6]。对于有同步观测的绝对重力点分布的测网,经典平差方法最简单实用。然而,由于历史资料及部分重力网的绝对重力点分布较少,测网的绝对重力控制得不到保证,因此拟稳平差在地震重力网平差中同样被广泛使用^[1,5]。

重力网平差对地震重力数据处理的可靠性

起着至关重要的作用^[7]。不同的平差方法获得的结果并不一致,甚至可能超过重力值随时间的变化量,成为研究重力场非潮汐变化的重要干扰之一^[8-9]。然而,目前对地震重力网经典平差和拟稳平差的深入研究较少,因选取与重力网不匹配的平差方法而导致所得重力场变化与真实结果不符的情况时有发生。因此,本文以南北地震带南段重力网的测量数据为基础,通过定义重力点值变化的指标量,定性与定量地分析经典平差和拟稳平差点值精度、段差残差和点值变化的差异,并探讨经典平差的起算基准及拟稳平差的拟稳点对区域重力场变化的影响,为地震重力网平差提供参考依据。

1 平差原理及数据处理

1.1 重力网经典平差和拟稳平差原理

地震重力测量是沿一条测线的同址往返测量,相邻两测点间的重力段差是测量的基本单元和重力网平差的最基本元素。根据图1所示的测量过程,可得出误差方程和权矩阵为^[5]:

$$V = AX - L \quad (1)$$

$$P = D(L)^{-1}\mu^2 \quad (2)$$

收稿日期:2020-02-26

项目资助:地震科技星火计划(XH20078Y);国家重点研发计划(2018YFC1503606);中国地震局震情跟踪课题(2018010209);三结合课题(CEA-JC/3JH-173701)。

第一作者:陈兆辉,硕士,主要从事地震重力数据处理和地球深部构造研究。czt_cea@163.com

式中, $V=(V_{2,1} V_{3,2} \cdots V_{2i-1,2i-2})^T$ 为误差向量; A 为系数矩阵; $X=(g'_1 g'_2 \cdots g'_i)^T$ 为未知数向量; $L=(\Delta g_{2,1} \Delta g_{3,2} \cdots \Delta g_{2i-1,2i-2})^T$ 为观测值向量; $D(L)$ 为观测方程协方差矩阵; P 为权矩阵; μ^2 为单位权方差。

若测网存在起算基准,即附加了约束条件,根据 $V^T P V = \min$ 原则,式(1)中的系数矩阵 A 列满秩,则未知数 X 有唯一解:

$$\begin{cases} X = N^{-1} W \\ \mu^2 = \frac{V^T P V}{n - t} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $N = A^T P A$; $W = A^T P L$; n, t 分别为观测方程个数和未知数个数。

若测网无起算基准,则式(1)系数矩阵 A 秩亏,解不唯一,此时可采用拟稳平差。设不稳定点的未知数为 X_1 ,拟稳点的未知数为 X_2 ,则式(1)变为:

$$V = (A_1 \ A_2)(X_1 \ X_2)^T - L \quad (4)$$

当附加最小范数条件 $X_2^T X_2 = \min$ 时,由式(4)的法方程,可求得拟稳点的未知数 X_2 以及非稳点的未知数 X_1 ^[9]:

$$\begin{cases} X_1 = N_{11}^{-1} (A_1^T P L - N_{12} X_2) \\ X_2 = M_m^- a^T P L \\ \mu^2 = \frac{V^T P V}{n - t} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $a^T = A_2^T - N_{21} N_{11}^{-1} A_1^T$; M_m^- 为最小范数逆矩阵; $N_{11} = A_1^T P A_1$; $N_{12} = A_1^T P A_2$ 。

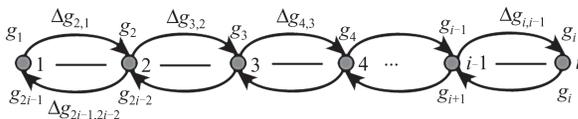


图1 地震重力测量示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Mobile Gravity Measurement

1.2 数据预处理及一次项系数评定

本文选用南北地震带南段重力网 2015—2016 年数据进行经典平差和拟稳平差研究,相对重力和绝对重力测量分别由 CG5 型相对重

力仪和 FG5 型绝对重力仪完成。重力网分布、各重力点观测次数及单程观测时间如图 2 所示。

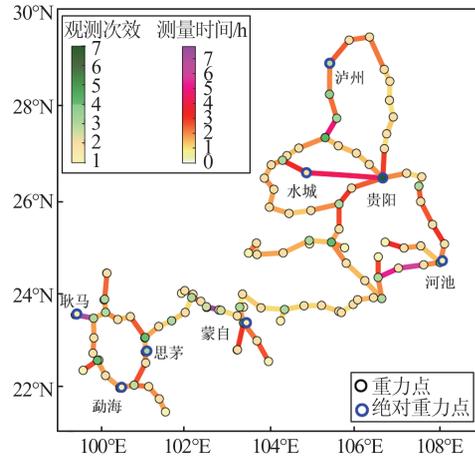


图2 研究区地震重力网及测量概况

Fig.2 Distribution of Mobile Gravity Network and Measurements in Study Area

地震重力测量受环境变化等因素影响,测量数据中存在偶然误差和系统误差。由于两期测量采用的仪器一致、观测人员相同,可有效地控制不同观测人员观测技术及习惯等引起的偶然误差^[10]。为消除或削弱系统误差,本文对相对重力数据进行固体潮、一次项系数和零漂等校正^[11],绝对重力数据进行固体潮、气压、极移和垂直梯度等校正。相对重力仪一次项系数测前利用段差 202 mGal 的贵阳、水城绝对点进行标定(系数 I),然而测网重力点值跨度达到 782 mGal,标定的重力段差并未完全覆盖测网读数段^[5]。因此,本文在数据预处理时以测网 8 个绝对点为基准对两台仪器的一次项系数进行重新标定(系数 II),结果和精度如表 1 所示。由表 1 可知,2015 年两台仪器系数 II 相比系数 I 增大 $1.01 \times 10^{-4} \sim 1.36 \times 10^{-4}$,变化较为一致;而 2016 年系数 II 相比系数 I,CG5 #1229 仪器减小 3.98×10^{-4} ,CG5 #1235 仪器增大 1.16×10^{-4} ,变化相差较大。

表 1 相对重力仪及一次项系数标定结果

Tab.1 Relative Gravimeter with Its One Degree Term of Chromatic Polynomial

测量时间	测量时长/d	仪器型号	一次项系数	
			系数 I	系数 II
2015-06-27—2015-08-15	50	CG5 #1229	0.999 674±0.000 047	0.999 775±0.000 038
		CG5 #1235	0.999 973±0.000 047	1.000 109±0.000 035
2016-08-27—2016-10-02	37	CG5 #1229	0.999 998±0.000 015	0.999 600±0.000 023
		CG5 #1235	1.000 066±0.000 015	1.000 182±0.000 023

本文采用系数 I、II 对 2016 年的重力数据进行平差,平均点值精度分别为 11.6 μGal 和 10.8 μGal 。基于系数 I、II 计算的重力段差和互差相关性的结果如图 3 所示。由图 3 可知,系数 II 拟合的线性相关性明显小于系数 I,说明系数 II 的两台仪器观测值互差较小,系统性误差更低。

此外,本文利用测网中 1 个绝对点为起算基准进行平差,统计计算剩余 7 个绝对点的平差值与实测绝对值差异,结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,系数 II 相比系数 I,绝对点的平差值在整体上更接近于实测的绝对值。因此,本文采用整网平差标定的系数 II 进行经典平差和拟稳平差研究,其中,经典平差采用精度

为 $\pm 5 \mu\text{Gal}$ 的弱基准。

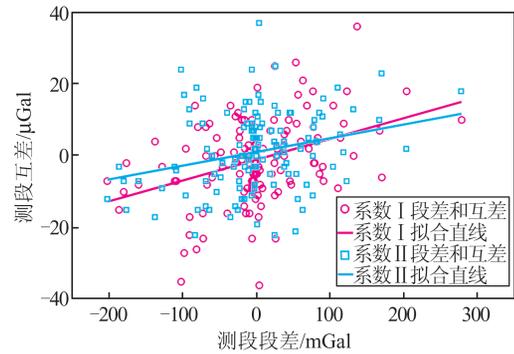


图 3 重力段差与互差相关性

Fig.3 Correlation Between the Section Difference and the Mutual Difference

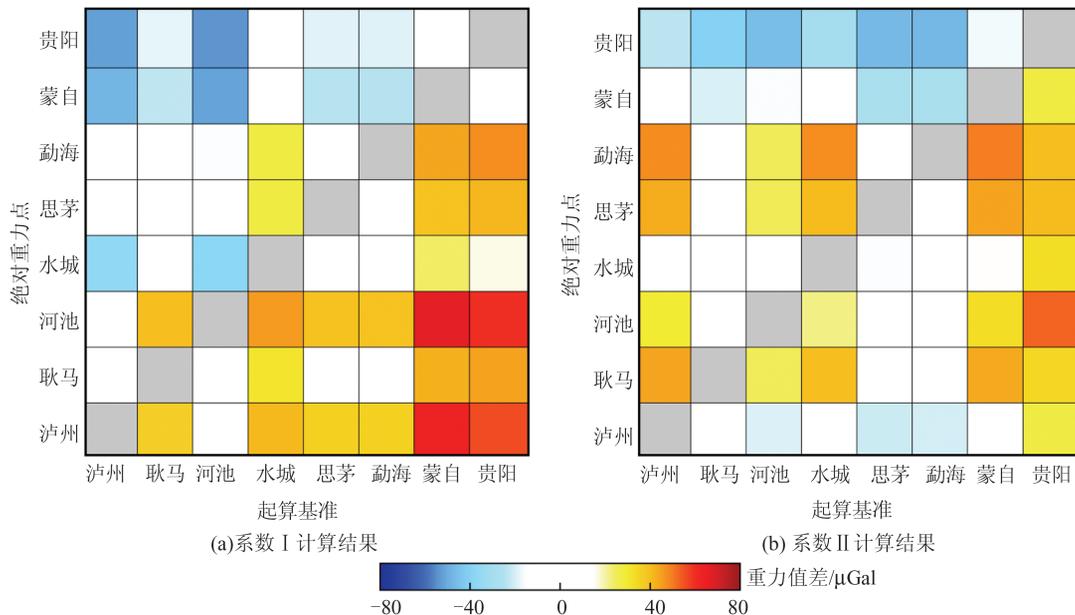


图 4 起算基准的平差值与实测绝对值差异

Fig.4 Difference Between the Adjustment Values and the Real Gravity Values at Absolute Gravity Stations

1.3 重力点值定量参数化指标量

地震重力测量的目的是利用平差后的重力点值提取监测区域多期重力点值的非潮汐变化信息,并识别其中的异常点,为地震趋势预报、地壳形变研究提供依据。在重力场变化分析时,经常采用会引入虚假异常信号的插值与滤波方法获得监测区域整体的时变重力场,忽略了点值误差的影响。因此,本文以重力点值变化叠加点值误差的可视化形式对重力场的变化情况进行客观分析和讨论,并在重力段差指标量^[11-13]的研究基础上,基于重力点值变化及误差,定义两种定量参数化指标量 P 值和 R 值,为分析区域重力场变化的显著性程度提供定量依据。

P 值的计算如下:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{(\delta g_i)^2}{e_i^2} \quad (6)$$

式中, N 为有效点值个数; δg_i 为第 i 个点值的变化; e_i 为第 i 个点值变化的误差。指数 P 反映的是测网重力点值变化的整体显著性程度,当 $0 < P \leq 1$ 时,认为测网的区域重力场变化不明显,当 $P > 1$ 时,则认为测网整体存在显著的重力场变化。

R 值的计算如下:

$$R_i = \frac{N_i}{N} \quad (7)$$

式中, $i=1, 2 \dots N$; N_i 为大于 i 倍误差的有效测点个数; R_i 为大于 i 倍误差变化的测点比例。

2 平差结果

2.1 精度评定

对2016年重力数据以8个绝对点为基准进行经典平差,点值精度如图5所示。由图5可知,绝大部分测点的平差精度优于12 μGal ,精度的差异性分布与测网网形结构密切相关,支线测点平差精度低于闭合环测点平差精度。对于一个由支线和闭合环组成的测网,根据误差传播定律,支线上第*i*个测点的平差精度可以表示为 $\sigma_i = \sqrt{i}\sigma_0$ (σ_0 为每个测段的观测精度)^[13]。对于支线测点来说,平差精度将随着支线测段数量的增加逐渐降低,闭合环则将误差按权重分摊到各个测段,从而避免了误差的积累。因此,为提升重力网平差的精度,在重力测量和数据处理时应尽量将过长的支线连成闭合环。

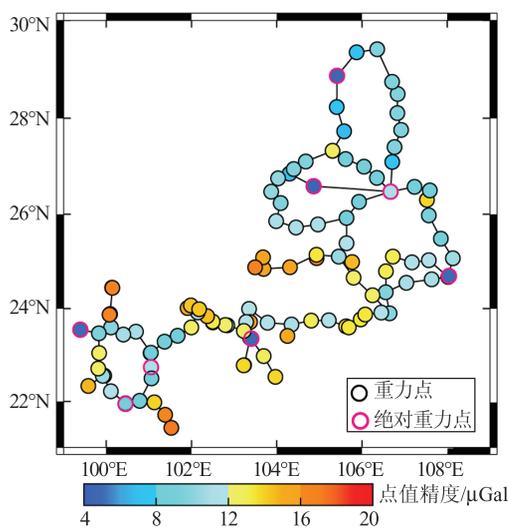


图5 重力网经典平差点值精度
Fig.5 Accuracy of Gravity Stations in Classic Adjustment of Gravity Network

为选取相对稳定重力点作为拟稳平差的拟稳点,本文首先开展测网绝对重力点的稳定性分析。图6为绝对点重力值的时序变化热力图,由图6可知,河池、水城、思茅、蒙自、泸州和贵阳的点值变化较为平稳,与其相对稳定的构造特征相吻合。耿马和勐海的点值时序变化较为剧烈,可能反映了其下方较为活跃的构造运动^[14]。因此,确定相对稳定的河池、水城、思茅、蒙自、泸州和贵阳测点为拟稳点。

此外,综合测网近年来重力场的动态变化结果^[15]和各测点的构造背景以及环境变化等信息,进一步选取砚山、关岭、西双版纳和安龙共10个重力点作为拟稳平差的拟稳点。拟稳平差的点

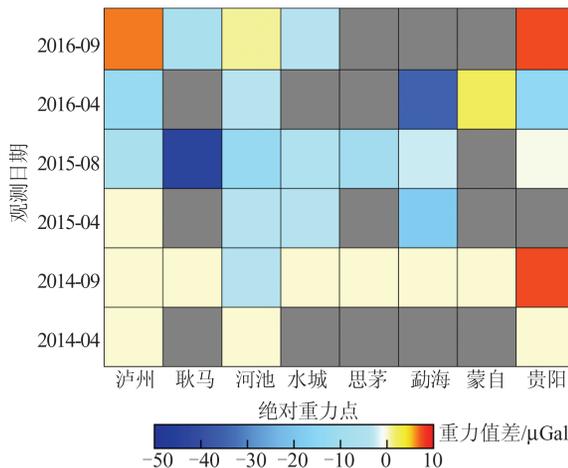


图6 绝对重力值时序变化热力图
Fig.6 Heatmap Chart for the Sequential Variation of Absolute Gravity Values

值精度如图7所示,可以看出,测网东部重力点的平差精度明显优于西部测点,这是因为大部分拟稳点及拟稳点的重心分布在测网东部,而拟稳平差以拟稳点的重心为起算基准。根据误差传播定律,远离起算基准的测网西部测点平差精度不及起算基准附近的测点。因此,为平衡拟稳平差点值精度的区域性差异,拟稳点应尽可能相对均匀地分布在重力网中。

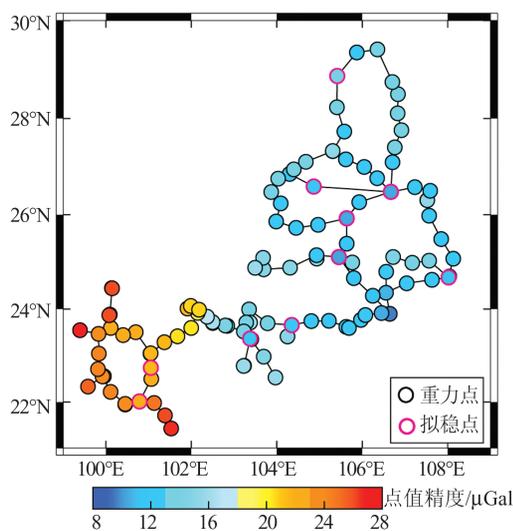


图7 重力网拟稳平差点值精度
Fig.7 Accuracy of Gravity Stations in Quasi-Stable Adjustment of Gravity Network

段差残差可以直观地反映平差后段差与原始段差的差异,是衡量平差方法质量和有效性的重要指标^[16]。图8为经典平差和拟稳平差的段差残差和统计直方图,由图8可知,两种平差方法获得的段差残差波动较小,残差值符合正态分布,并且绝大部分残差分布在 $\pm 5 \mu\text{Gal}$ 以内。两种平

差方法计算的重力段差均能较好地还原真实段差值,其中,经典平差的残差标准差为 2.99 μGal ,拟稳平差的残差标准差为 2.06 μGal 。经典平差由于受基准点的控制,能更好地控制误差传递,减少重

力段差的误差,而拟稳平差以拟稳点重心为基准,缺少控制,因此更与原始测量重力段差值接近。可见,经典平差比拟稳平差能更好地进行段差值修正,更真实地反映重力段差值的客观变化。

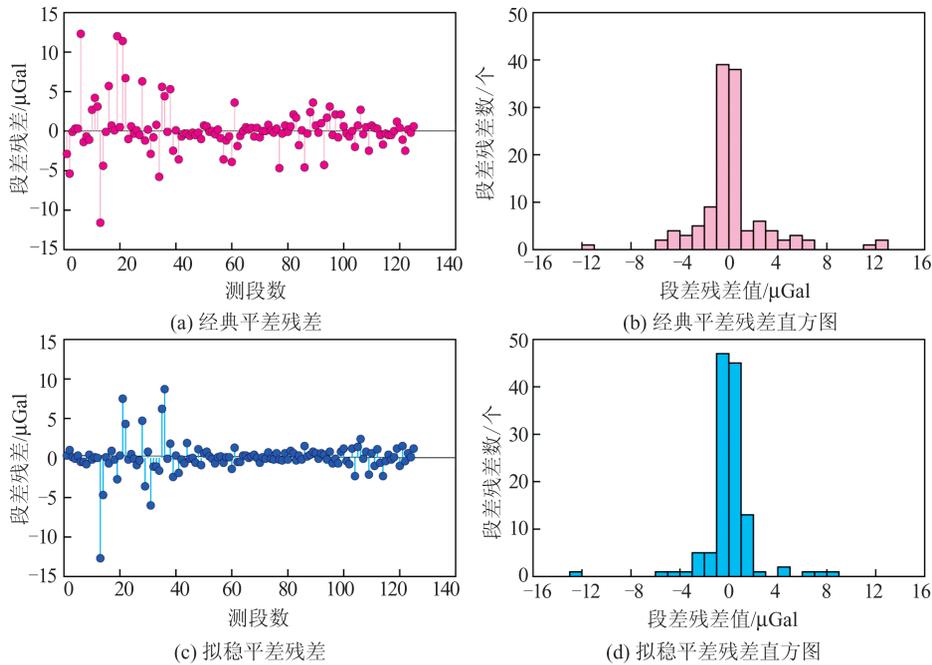


图 8 重力段差残差及统计直方图

Fig.8 Residuals and Its Histograms of the Gravity Section

2.2 重力点值变化

利用绝对点(见图 5)和拟稳点(见图 7)对 2015—2016 年的重力数据进行经典平差和拟稳平差,获得两种平差方法一年尺度的重力网点值

变化和点值变化的差异情况,结果如图 9 所示。其中,黑色和灰色重力点由于点位破坏和环境变迁,导致重力点值变化失真,因此数据分析时将不再讨论。

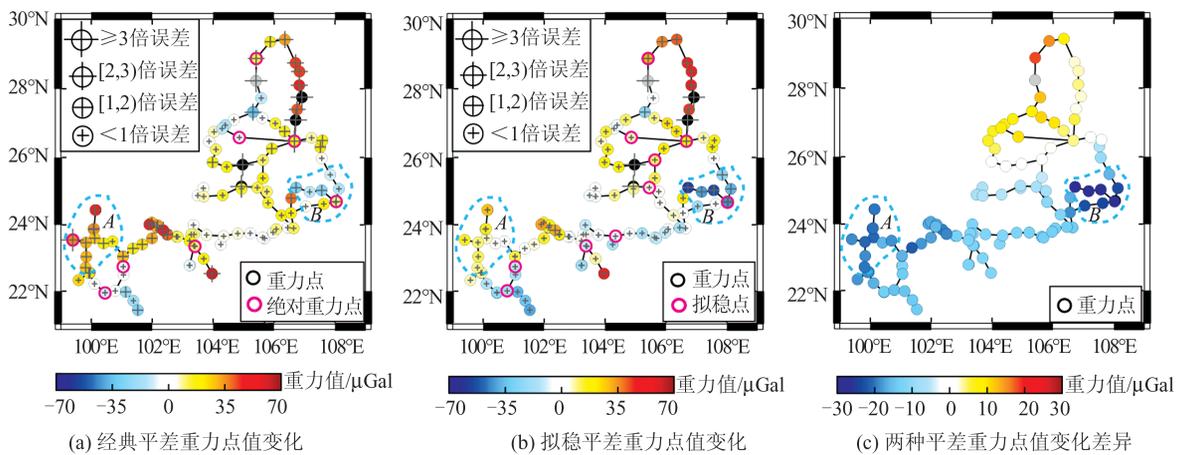


图 9 2015—2016 年经典平差和拟稳平差的重力网点值变化

Fig.9 Gravity Values Variation in Gravity Network of Classical and Quasi-Stable Adjustment Methods from 2015 to 2016

由图 9 可知,经典平差和拟稳平差的点值在测网北部和西南部均存在突出的重力值正变化,而渤海周围测点则以重力值负变化为主;两种平差方法

在整体上能较为一致地呈现测网重力场变化的形态和趋势,但在某些局部区域仍然存在一定的差异,最大差异可达 30 μGal 。区域 A 经典平差重力

值的正变化比拟稳平差剧烈,甚至存在大于3倍误差的重力值正变化;区域B拟稳平差的河池点重力变化值为负值,且附近存在突出的负变化,而经典平差的河池重力值为正变化。结合图6可知,2016年第2期的耿马、河池点的绝对重力值相比2015年同期大,增量分别为36 μGal 、11 μGal 。经典平差以起算点值作为其他各点值的计算基准,起算点值的变化直接影响其他各点值的变化;拟稳平差以全部拟稳点的重心为起算基准,某一拟稳点的点值变化对其他测点的点值影响较小,造成了两种平差方法在起算点附近点值变化的显著差异。表2给出了两种平差点值变化的定量参数化指标量 P 值和 R 值,其中, J_1 和 J_2 分别表示时变和不变基准的经典平差的指标量结果, N_1 和 N_2 分别表示稳定和不变拟稳点的拟稳平差的指标量结果。

表2 经典平差和拟稳平差的指标量 P 值和 R 值

Tab.2 Indexes P and R of Classical and Quasi-Stable Adjustment Method

统计项	平差方法	点/(值)	P	R		
				R_1	R_2	R_3
J_1	经典平差	基准值(时变)	1.70	0.41	0.09	0.02
N_1	拟稳平差	拟稳点(稳定点)	0.55	0.16	0	0
J_2	经典平差	基准值(不变)	0.96	0.32	0.06	0.01
N_2	拟稳平差	拟稳点(非稳定点)	0.41	0.11	0	0

由表2可知,经典平差 J_1 的 P 值和 R 值均明显大于拟稳平差 N_1 ;经典平差 J_1 的 $P=1.70>1$,表明测网整体存在较为突出的重力点值变化,而拟稳平差 N_1 的 $P=0.55<1$,反映测网整体的重力点值变化不显著。

尽管两种平差方法在重力场点值变化的显著性程度以及局部区域的点值变化上存在差异,但对于绝对点较少或者无绝对点分布的测网,选择合理恰当的拟稳点,拟稳平差的重力场变化趋势整体与经典平差差别不大。这也为处理无绝对点分布的历史重力网资料及绝对点分布较少的重力网资料提供了一种参考。

2.3 起算点/拟稳点对重力点值变化影响

地震重力测量中绝对重力与相对重力测量时间同步,为平差计算提供随时间变化的时变基准是较为理想的情况。实际上由于国内高精度绝对重力仪数量偏少、仪器故障等原因,绝对重力与相对重力的测量时间并不完全同步^[10]。采用经典平差可能会将某期的绝对重力值用于相邻的多期资料中,使得平差的起算基准恒定不变。图10为采用相同起算基准进行经典平差计算的点值变化,以及与时变基准平差的点值变化的差异。

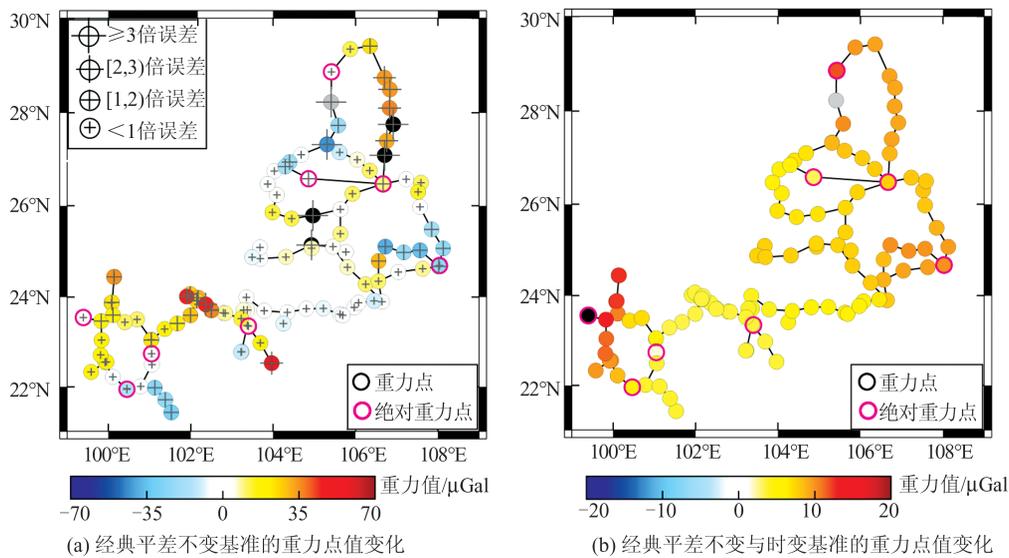


图10 经典平差不变基准的点值变化及其与时变基准结果的差值

Fig.10 Gravity Values Variation in Gravity Network Calculated by Classical Adjustment Method with Fixed Benchmark and Difference Between It and that with Changing Benchmark

由图10可知,与采用时变基准的重力点值变化相比,测网整体的重力点值变化形态较为一致。但在耿马和泸州等绝对点值变化较大的区域差异性显著,差异大小与绝对值的变化幅度基本一致。此外,结合定量参数指标量(见表2)可

知,相同点值精度情况下,不变基准 J_2 的指标量远小于时变基准 J_1 的结果。 J_2 的指标量 $P=0.96$,表明测网重力点值变化的异常程度不高,与 J_1 的指标量 $P=1.70$ 所反映的测网整体存在较为突出的重力点值变化的结果截然相反。可见,经

典平差的起算基准对重力网点值变化的显著性程度密切相关,不变的起算基准大幅度减小了定量参数化指标量的 P 值和 R 值,降低了其反映的重力网点值变化显著性程度,对分析重力场变化与地壳运动及地震趋势预报的关系^[17]造成一定的干扰。因此,为了真实客观地反映重力场变化的显著性程度,重力网优化改造时应继续完善与扩大绝对重力测量的时空监测能力,为重力网平差计算提供高精度的时变基准。

为分析非稳定的拟稳点对拟稳平差点值变化的影响,本文选取了测网中地质构造复杂、断裂活动较为活跃^[15]的 10 个非稳定点作为拟稳点,获得 2015—2016 年拟稳平差的重力网点值变化结果。非稳定点及断裂分布如表 3 所示。

图 11(a) 为非稳定点拟稳平差的重力网点值变化结果,结合图 9(a)、9(b) 可知,利用非稳定点作为拟稳点进行拟稳平差的点值变化结

果,与经典平差以及稳定点作为拟稳点的拟稳平差的点值变化结果均存在显著差异。测网西南部区域 C 的点值变化存在严重的扭曲和畸变,未能客观真实地反映区域重力场的变化趋势。图 11(b) 给出了两种拟稳点下拟稳平差的重力点值变化差异情况,发现拟稳点选取不当将可能导致重力点值变化存在整体系统性偏差。

表 3 拟稳点及断裂分布^[15]

Tab.3 Distribution Quasi-Stable Points and Fractures

拟稳点	断裂分布	拟稳点	断裂分布
耿马	南宁河断裂(F1)	石屏	建水-石屏断裂(F6)
澜沧	龙陵-澜沧断裂(F2)	百色	百色-合浦断裂(F7)
勐海	打洛-景洪断裂(F3)	永川	华荣山断裂(F8)
普洱	镇远-普洱断裂(F4)	盘江	曲靖断裂(F9)
扬武	红河断裂(F5)	贵定	贵定-富泉断裂(F10)

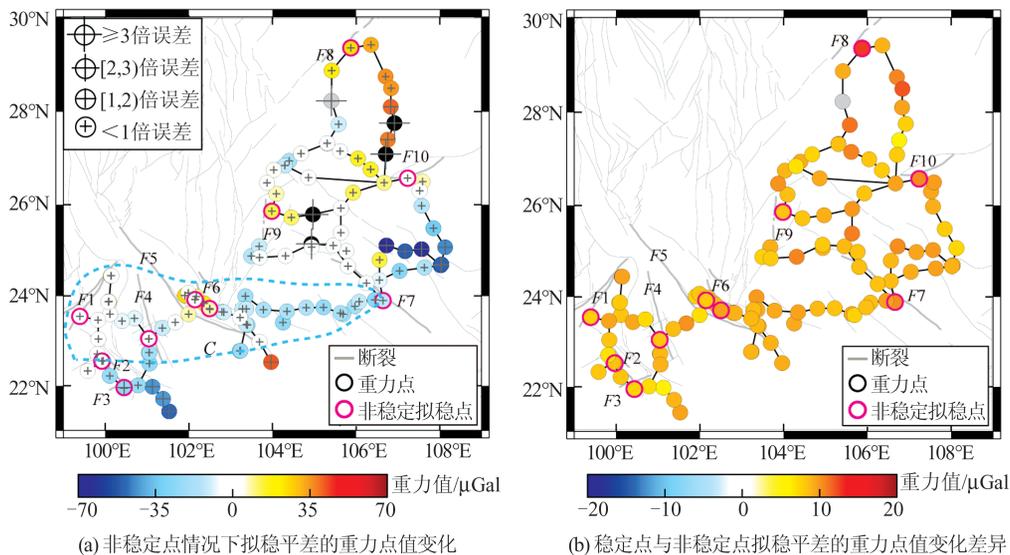


图 11 非稳定点拟稳平差的重力网点值变化及其与稳定点结果的差值

Fig.11 Gravity Values Variation Calculated by Quasi-Stable Adjustment Method with Unstable Points and Difference Between It and that with Stable Points

图 12 为利用非稳定点作为拟稳点进行拟稳平差的段差残差结果,由图 12 可知,非稳定点拟稳平差的段差残差相比稳定点拟稳平差(见图 8(c))上下波动幅度大,对重力段差的还原不及稳定点的平差结果。此外,表 2 中非稳定点 $N2$ 指标量 P 值和 R 值明显小于稳定点 $N1$,表明非稳定的拟稳点削弱了重力场点值变化的显著性异常程度。可见,拟稳点的选择直接关系到拟稳平差结果,对重力场变化的形态至关重要。拟稳点的选取要结合测网以往的重力点值变化资料和测点的区域构造背景,避开构造活动、断裂运动等地质背

景较为复杂的测点,以及地下水开采及工业活动等易造成观测环境和重力值发生较大变化的区域^[18-19]。

3 结 语

重力场的动态演化特征是地震预测和地壳运动等研究的重要信息来源,根据区域重力网的实际情况,选用合适的平差方法才能获取接近真实的重力场变化信息。本文基于南北地震带南段重力网 2015—2016 年的地震重力测量数据,有效地削弱偶然误差和系统误差的影响,对经典平

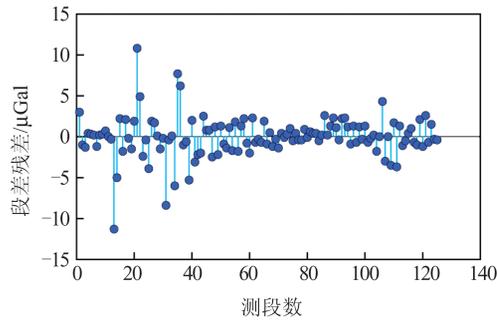


图12 非稳定点拟稳平差的段差残差

Fig.12 Gravity Segment Difference Residuals Calculated by Quasi-Stable Adjustment Method of Unstable Points

差和拟稳平差开展深入的研究,得到以下结论:(1)提出了利用平差点值精度、重力段差与互差相关性、绝对点平差值与绝对值的差异结果来综合评定一次项系数优劣的方法。经典平差和拟稳平差的段差残差波动较小,对重力段差的恢复情况较好,标准差分析表明经典平差比拟稳平差能更真实地反映重力段差变化。(2)基于重力点值变化及其误差定义了两种定量参数化指标量 P 值和 R 值,为分析区域重力场点值变化的显著性程度提供定量依据。经典平差和拟稳平差的2015—2016年重力网点值整体变化具有较为近似的重力场变化形态和趋势,拟稳平差的指标量 $P=0.55(<1)$,远小于经典平差的 $P=1.70(>1)$ 。(3)经典平差起算基准对重力网的点值变化息息相关,并直接影响定量参数化指标量 P 值和 R 值。在点值变化误差相同的前提下,不变基准的指标量 $P=0.96(<1)$ 小于时变基准的指标量 $P=1.70(>1)$,降低了其反映的重力场变化显著性程度。拟稳点决定了拟稳平差的重力场变化形态与真实重力场变化的近似程度,非稳定的拟稳点将导致重力点值变化发生扭曲和畸变。

参 考 文 献

- [1] Zhu Yiqing, Liu Fang, Li Tieming, et al. Dynamic Variation of the Gravity Field in the Sichuan-Yunnan Region and Its Implication for Seismic Risk[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(11): 4 187-4 196 (祝意青,刘芳,李铁明,等.川滇地区重力场动态变化及其强震危险含义[J].地球物理学报,2015,58(11):4 187-4 196)
- [2] Chen Guoxiong, Sun Jinsong, Liu Tianyou. Wavelet Multi-scale Decomposition of Time Variable Gravity Field Detected by GRACE Satellite: a Case from Wenchuan Ms 8.0 Earthquake,2008[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 679-682(陈国雄,孙劲松,刘天佑. GRACE卫星时变重力场的小波多尺度分解:以2008年汶川Ms8.0大地震为例[J].武汉大学学报·信息科学版,2012,37(6):679-682)
- [3] Xu Houze. Function of Gravimetry in CMONOC [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2003, 23(3): 1-3 (许厚泽.重力观测在中国地壳运动观测网络中的作用[J].大地测量与地球动力学,2003,23(3):1-3)
- [4] Chen Shi, Wang Qianshen, Zhu Yiqing, et al. Regional Gravity Variation Before Wenchuan Ms 8.0 Earthquake and Epicentroid Research [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(4): 1 147-1 156 (陈石,王谦身,祝意青,等.汶川Ms 8.0震前区域重力场变化与震质中研究[J].地球物理学进展,2011,26(4):1 147-1 156)
- [5] State Seismological Bureau. Specification for Seismic Gravity Measurements[S]. Beijing: Seismological Press, 1979 (国家地震局.地震重力测量规范[S].北京:地震出版社,1979)
- [6] Sun Shao'an, Kang Kaixuan, Huang Bangwu. Thinking on Datum of Regional Gravity Field Variation [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(1): 17-20 (孙少安,康开轩,黄邦武.关于区域重力场变化基准的思考[J].大地测量与地球动力学,2012,32(1):17-20)
- [7] Yang Yuanxi, Guo Chunxi, Liu Nian, et al. Datum and Quality Control for Synthetic Adjustment of Absolute and Relative Gravity Networks [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2001, 10(2): 11-14 (杨元喜,郭春喜,刘念,等.绝对重力与相对重力混合平差的基准及质量控制[J].测绘工程,2001,10(2):11-14)
- [8] Li Hui, Liu Dongzhi, Liu Shaofu. Integrated Adjustment Models for the Seismic-Gravity Network [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1991, 11(SI): 68-74 (李辉,刘冬至,刘绍府.地震重力监测网统一平差模型的建立[J].地壳形变与地震,1991,11(SI):68-74)
- [9] Liu Shaofu, Liu Dongzhi, Li Hui. Adjustment of High Precision Gravity Measurement and Its Software [J]. *Earthquake*, 1991, 11(4): 57-66 (刘绍府,刘冬至,李辉.高精度重力测量平差及其软件[J].地震,1991,11(4):57-66)
- [10] Lederer M. Accuracy of the Relative Gravity Measurement [J]. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2009, 6(3): 383-390
- [11] Li Xiaoyi, Chen Shi, Lu Hongyan. The Index Definition, Interpretation and Visualization of Discrete

- Time-Variable Gravity Data[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2017, 39(5): 682-693 (李晓一, 陈石, 卢红艳. 离散时变重力数据的可视化、指标量定义与解释[J]. 地震学报, 2017, 39(5): 682-693)
- [12] Wang Tongqing, Chen Shi, Liang Weifeng, et al. Variations of the Gravity Field and Quantitative Parameter Analysis Before the 2016 Menyuan Ms 6.4 Earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 2018, 40(2): 349-360 (王同庆, 陈石, 梁伟锋, 等. 2016 年门源 Ms 6.4 地震前的区域重力场变化与定量参数分析[J]. 地震地质, 2018, 40(2): 349-360)
- [13] Wei Shouchun, Zhu Yiqing, Liang Weifeng, et al. Impact on Gravity Data Analysis of Network Structure [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(10): 1 063-1 067 (隗寿春, 祝意青, 梁伟锋, 等. 网形结构对重力数据分析结果的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(10): 1 063-1 067)
- [14] Deng Qidong, Zhang Peizhen, Ran Yongkang, et al. Basic Characteristics of Active Faults in China [J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2002, 32(12): 1 020-1 030 (邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(地球科学), 2002, 32(12): 1 020-1 030)
- [15] Chen Zhaohui, Wang Tongqing, Liu Jinzhao, et al. Analysis of Gravity Field Change and Index Quantity in Southern Part of the South-North Seismic Belt [J]. *Journal of Seismological Research*, 2018, 41(3): 480-486 (陈兆辉, 王同庆, 刘金钊, 等. 南北地震带南段近期重力场变化与指标量分析[J]. 地震研究, 2018, 41(3): 480-486)
- [16] Chong Yang, Chai Hongzhou, Su Mingxiao, et al. RAE-PEKF Matching Algorithm Based on Measurement Residuals to Estimate Residuals Covariance [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(2): 179-188 (种洋, 柴洪洲, 苏明晓, 等. 基于量测残差估计残差协方差的 RAE-PEKF 匹配算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(2): 179-188)
- [17] Zhu Yiqing, Shen Chongyang, Zhang Guoqing, et al. Rethinking the Development of Earthquake Monitoring and Prediction in Mobile Gravity [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(5): 441-446 (祝意青, 申重阳, 张国庆, 等. 我国流动重力监测预报发展之再思考[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(5): 441-446)
- [18] Jiang Zhiheng, Liu Nailing. On the Quasi-Stable Adjustment for Gravity Net[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 1991, 16(2): 12-17 (江志恒, 刘乃苓. 重力网拟稳平差[J]. 测绘科技动态, 1991, 16(2): 12-17)
- [19] Li Yuzhi, Zhen Hongfeng. A Quasi-Stable Adjustment Method of Excluding Gross Errors[J]. *Journal of Geomatics*, 2017, 42(1): 46-48 (李玉芝, 甄红锋. 粗差剔除的一种拟稳平差方法[J]. 测绘地理信息, 2017, 42(1): 46-48)

Comprehensive Analysis and Research of Classic Adjustment and Quasi-Stable Adjustment in Mobile Gravity Network

CHEN Zhaohui¹ ZHANG Shuangxi¹ LIU Jinzhao¹ ZHANG Pin¹ ZHU Chuandong¹

¹ The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

Abstract: Objectives and Methods: Based on the mobile gravity data from 2015 to 2016 in the southern segment of the North-South Seismic Belt, this paper conducts in-depth comparative analysis of classical adjustment and quasi-stable adjustment, and provides a method for evaluating the coefficient of one degree term of relative gravimeter. Two quantitative parameterized indexes, P and R , are defined with the gravity change and error, providing a quantitative basis for analyzing the significance level of the gravity changes in the network. **Results:** Results indicate that accuracy of gravity values is closely related to the shape of gravity network, and long branches should be connected into closed ring as much as possible before data preprocessing. The overall shape of gravity change from 2015 to 2016 calculated by quasi-stable adjustment is in consistent with that by classical adjustment, but the index ($P=0.55$) is lower than that of classical adjustment ($P=1.70$). The starting benchmark of classical adjustment is of great importance to the gravity change in the network. Under the same error of gravity change, the significance level of the gravity changes is re-

duced with fixed gravity value of benchmark compared to that with changing gravity value, with the index P reduced from 1.70 to 0.96. **Conclusions:** The quasi-stable point is crucial to the result of the quasi-stable adjustment, which determines the authenticity of the gravity changes in the network. These results can provide reference for the adjustment calculation of mobile gravity network.

Key words: quasi-stable adjustment; classic adjustment; mobile gravity network

First author: CHEN Zhaohui, master, specializes in seismic gravity data processing and deep earth structure. E-mail: czh_cea@163.com

Foundation support: Science for Earthquake Resilience(XH20078Y); the National Key Research and Development Program of China (2018YFC1503606); the Earthquake Tracking Task of CEA(2018010209); Combination Project with Monitoring, Prediction and Scientific Research of Earthquake Technology, CEA(CEA-JC/3JH-173701).

引文格式: CHEN Zhaohui, ZHANG Shuangxi, LIU Jinzhao, et al. Comprehensive Analysis and Research of Classic Adjustment and Quasi-Stable Adjustment in Mobile Gravity Network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(11): 1693-1702. DOI: 10.13203/j.whugis20200053(陈兆辉, 张双喜, 刘金钊, 等. 地震重力网经典平差与拟稳平差综合分析与研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11): 1693-1702. DOI: 10.13203/j.whugis20200053)