DOI:10.14075/j.jgg.2024.12.583
文章编号:1671-5942(2025)12-1281-06

相对重力平差算法的优化

周天祥[1] 杨光亮[1,2] 谈洪波[1,2] 王嘉沛[1,2] 陈子恒[1]
张明辉[1,2] 秦海涛[1] 刘 胜[1] 孟恒舟[1]

1 中国地震局地震研究所,武汉市洪山测路 40 号,430071
2 湖北省地震局,武汉市洪山测路 48 号,430071

摘 要:通过模拟的重力数据平差对比不同漂移模型和平差方法的差别,并在此基础上对重力平差算法进行一定优化,提出多次段差平差和约束线性规划平差的方法。结果表明,多次段差平差方法部分优于其他平差方法,约束线性规划平差方法整体优于其他平差方法。

关键词:流动重力观测;重力平差;仪器漂移;算法优化;段差
中图分类号:P312 **文献标识码**:A

可靠和精确的重力数据是了解地球重力场及其变化的关键,相对重力测量是现代获取重力数据的重要方法。重力数据处理一般是先对各点重力值进行相应的各项修正,之后进行重力平差。传统平差[1]将仪器漂移率作为常数进行平差,该方法简单但精度不高。使用多项式漂移拟合后再进行平差,精度更高[2]。贝叶斯平差[3]能有效估计非线性漂移率。改进的贝叶斯平差[4]能够进一步拟合格值系数。相对重力测量基准点的设置会影响误差分布,使得误差在相邻站点传递,这种误差传播是传统平差方法难以处理的。为此,本文通过模拟的重力数据平差对比不同漂移模型和平差方法的差别,并在此基础上提出 2 种重力平差的优化算法。

1 重力平差

1.1 传统重力平差

在相对重力测量中,通常采用重力段差进行平差,同时给定基准值或绝对重力点重力值,然后求得各点的真实重力值,本文将其称为传统重力平差模型[1],其观测方程为:

$$\nabla g_{AB} = g(\vec{r}_B) - g(\vec{r}_A) + \dot{D}_k(t_B - t_A) + \varepsilon_{AB} \tag{1}$$

式中,$\dot{D}_k$ 为漂移率;ε_{AB} 为残差;$g(\vec{r}_B)$、$g(\vec{r}_A)$ 为相邻 2 点重力值;∇g_{AB} 为相邻 2 点重力段差值。计算各个测点的重力段差,形成 n 个方程,将这些方程写成矩阵形式:

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{AX} + \boldsymbol{V} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{L}$ 为重力段差值矩阵;$\boldsymbol{A}$ 为未知数系数矩阵;$\boldsymbol{X}$ 为未知数矩阵;$\boldsymbol{V}$ 为残差矩阵。根据最小二乘原理,未知数必须满足 $\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PV} = \min$ 的条件,最终求得的未知数矩阵为:

$$\boldsymbol{X} = (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PA})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PL} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{P}$ 为权重矩阵,由于观测值相互独立,所以 $\boldsymbol{P}$ 为对角矩阵。权重矩阵对角值可用式(4)表示,其中 s_d 为重力段差先验标准差。

$$P_i = \frac{1}{s_d^2} \tag{4}$$

写成矩阵形式为:

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} p_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & p_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

单位权中误差表达式为:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PV}}{r} \tag{6}$$

标准差为:

$$\mathrm{SD} = (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PA})^{-1}\hat{\sigma}_0^2 \tag{7}$$

式中,$\hat{\sigma}_0^2$ 为单位权中误差;r 为多余观测数。

1.2 改进的重力平差

传统平差方法将漂移率视为常数,这与现实

收稿日期:2024-12-30
项目来源:国家自然科学基金(42174104, U1939204);科技部科技基础资源调查专项(2023FY10150502);湖北省自然科学基金(2022CFB350);中国地震局地震科技星火计划(XH23014YC)。
第一作者简介:周天祥,硕士生,主要从事重力相关算法研究,E-mail:zhoutianxiang24@mails.ucas.ac.cn。
通讯作者:谈洪波,副研究员,主要从事重力与构造活动反演研究,E-mail:thbhong@163.com。

情况不符,仪器漂移率并非是不变的。为更加接近真实结果,可在平差之前先进行漂移拟合,然后对每个站点进行漂移校正,最后再进行平差[2,5]。本文将该平差方法称为漂移拟合后平差。漂移拟合需要每个站点的重力漂移率,然后根据漂移率选择拟合的模型。每个站点的漂移率计算公式为:

$$y=\frac{(g'-g)-\sum(g'_i-g_i)}{(t'-t)-\sum(t'_i-t_i)} \tag{8}$$

式中,g、g' 和 t、t' 分别为测段起始点往返观测值和观测时刻,g_i、g'_i和t_i、t'_i分别为需要计算静态漂移的观测点到达和离开时的观测值及相应的观测时刻。漂移率计算的是相同站点在不同时间的测量值之差除以测量时间差,根据测量数据得到各个站点的漂移率,然后使用这些漂移率进行拟合,得到仪器漂移率。一般使用最小二乘拟合方法进行计算,常用的拟合模型有常数漂移拟合、一次项漂移拟合、二次项漂移拟合、三次项漂移拟合以及更高阶的漂移拟合。

使用多项式拟合漂移率:

$$D=a_0+a_1x+\cdots+a_kx^k \tag{9}$$

首先确定拟合的多项式的阶数 k,即 k 次拟合。然后构建设计矩阵 $\boldsymbol{M}$,行数为拟合次数加 1,列数为观测值个数。

$$\begin{bmatrix}1 & 1 & \cdots & 1\\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ x_1^k & x_2^k & \cdots & x_n^k\end{bmatrix} \tag{10}$$

式中,x_n 为第 n 个时间点,是相同站点 2 次测量时间的平均时间。测量值矩阵 $\boldsymbol{Y}$ 可表示为:

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}y_1 & y_2 & \cdots & y_n\end{bmatrix} \tag{11}$$

构建需要拟合的系数 a_k 矩阵:

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}a_0 & a_1 & \cdots & a_k\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

则:

$$\boldsymbol{D}=(\boldsymbol{M}\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{M}\boldsymbol{Y} \tag{13}$$

最终得到需要的漂移拟合结果。根据漂移率对每个站点进行漂移校正,之后进行平差,则观测方程可表示为:

$$\nabla g_{AB}=g(\vec{r}_B)-g(\vec{r}_A)+\varepsilon_{AB} \tag{14}$$

形成矩阵:

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{V} \tag{15}$$

给定权重:

$$P_i=\frac{1}{s_d^2} \tag{16}$$

形成权重矩阵:

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}p_1 & & 0\\ & \ddots & \\ 0 & & p_n\end{bmatrix} \tag{17}$$

最终求得的未知数矩阵为:

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{L} \tag{18}$$

权中误差为:

$$\hat{\sigma}_0^2=\frac{\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{V}}{r} \tag{19}$$

标准差为:

$$\mathrm{SD}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A})^{-1}\hat{\sigma}_0^2 \tag{20}$$

2 方法分析

通过给予不同站点重力真值一定的漂移值和随机误差,得到相应的模拟数据,以评估不同平差方法的差异,同时默认其他因素对模拟测量数据的影响都已扣除。模拟重力数据站点有 47 个,按照重力测网测量方法依次进行测量,共产生 144 个测量数据,总测量时间在半个月以上,能够有效模拟实际重力测量数据,进而评价不同测量方法。表 1 为模拟数据的真值。

表 1 模拟数据的真值

Tab. 1 True values of simulated data

站点名	真值/μGal	站点名	真值/μGal
sta1	2 553.15	sta25	2 554.32
sta2	2 553.01	sta26	2 553.80
sta3	2 550.28	sta27	2 552.69
sta4	2 553.41	sta28	2 554.55
sta5	2 553.81	sta29	2 552.34
sta6	2 550.48	sta30	2 551.08
sta7	2 552.27	sta31	2 553.27
sta8	2 553.94	sta32	2 554.36
sta9	2 551.07	sta33	2 550.59
sta10	2 552.35	sta34	2 550.28
sta11	2 550.94	sta35	2 554.25
sta12	2 553.02	sta36	2 552.81
sta13	2 550.77	sta37	2 550.10
sta14	2 552.17	sta38	2 552.90
sta15	2 554.42	sta39	2 554.08
sta16	2 554.65	sta40	2 550.57
sta17	2 550.85	sta41	2 553.29
sta18	2 551.55	sta42	2 554.80
sta19	2 553.20	sta43	2 554.77
sta20	2 551.34	sta44	2 552.76
sta21	2 553.41	sta45	2 553.46
sta22	2 550.98	sta46	2 553.86
sta23	2 551.47	sta47	2 553.17
sta24	2 552.64		

考虑使用分段线性漂移模型[6],在重力站点的模拟真值上添加一定的漂移量来模拟仪器漂移[7]产生的误差。研究表明,CG-5 重力仪的静态漂移率为线性漂移,因此漂移率按照分段线性漂移率进行设置,同时给予一定的随机偏差[8]来模

拟实际测量时产生的误差。

图 1 为采用一次、二次、三次多项式模型的平差结果对比,平差过程中,将站点 1 设置为基准站,基准值设置为站点 1 的真实值,将平差的站点值与站点真实值相减得到偏差值。由图可知,基准站的平差值相差最小,之后站点偏差不稳定,总体呈上升趋势,与站点真实值偏差逐渐增大。这可能是因为段差平差需要基准值来确定其他站点值,通过基准站得到的站点 2 数值会和实际值存在一定误差,而站点 2 和站点 3 数值也存在一定误差,所以站点 3 数值不仅包含站点 1 和站点 2 之间的误差,同时也包含站点 2 和站点 3 之间的误差。依此类推,越往后的站点值积累的误差越多,这些误差可能有正有负,使得站点的平差值与真实值的偏差出现波动,但随着误差累积,这个偏差总体呈上升趋势。这与图像所呈现的特征一致,即平差结果的准确性会受到基准站选取的影响。

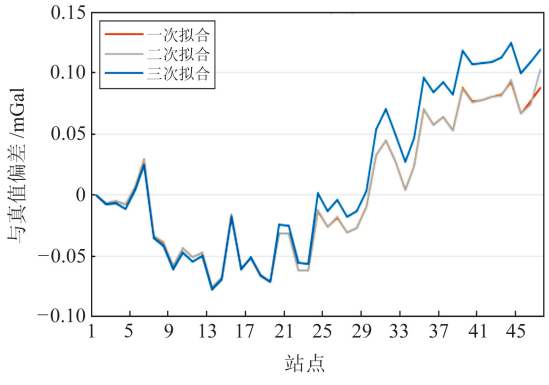


图 1　不同漂移拟合次数结果对比

Fig. 1　Comparison of results with different drift fitting times

为进一步验证上述想法的正确性,增加基准站进行平差。按照上述分析,如果再将站点 25 设置为基准站,站点平差值的偏差将会缩小。图 2 中二基站将站点 25 和站点 1 设置为基准站,一基站将站点 1 设置为基准站。从图中可以看出,站点 1 和站点 25 之间的站点在设置 2 个基站的情况下偏差更小,但之后的站点的偏差却变得更大。

图 3 中三基站将站点 1、站点 25 和站点 47 设置为基准站,二基站将站点 1 和站点 47 设置为基准站,一基站将站点 1 设置为基准站。由图可知,二基站结果 2 个基准站周围的基准值偏差较小,但中间平差值的偏差却越来越大,这是因为两边站点为基准站,误差都累积到中间部分的站点。同时可以看出,三基站的平差效果最好,各个站点的平差值与真实值的偏差相对其他情况最小。

综上可知,基准站的设置会影响平差结果,距

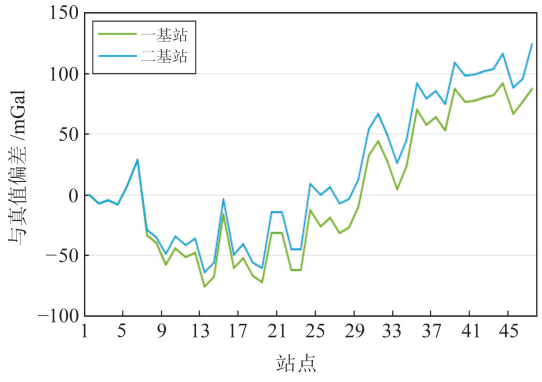


图 2　不同基站结果对比

Fig. 2　Comparison of results of different base stations

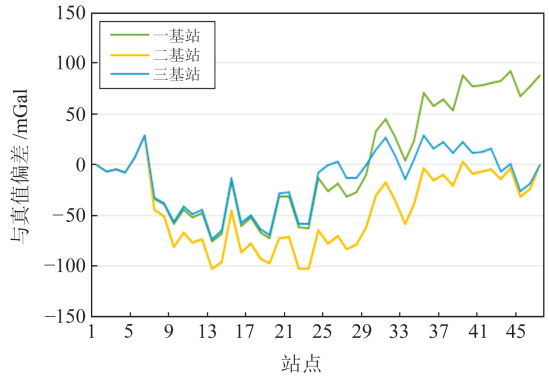


图 3　不同基站设置结果对比

Fig. 3　Comparison of results of different base station configurations

离基准站越近的平差值越接近真实值,因此基准站最好均匀地分布在整个测网中,这样平差效果会更好;同时基准站越多,平差效果也越好。

误差主要分为偶然误差、系统误差和粗差。在只包含期望为 0 的正态分布的偶然误差的情况下,最小二乘为最佳线性无偏估计,但观测中会不可避免地存在粗差[9],这会影响平差结果。抗差估计可以较好地处理这部分粗差,抗差估计主要是通过迭代修正权阵的方式来实现的,如 IGG Ⅲ[10]的权定义为:

$$\bar{p}_i=\begin{cases}p_i, & |v_i'|=\left|\dfrac{v_i}{\sigma_{v_i}}\right|\leqslant k_0\\ p_i\cdot\dfrac{k_0}{|v_i'|}\left(\dfrac{k_1-|v_i'|}{k_1-k_0}\right)^2, & k_0<|v_i'|\leqslant k_1\\ 0, & |v_i'|>k_1\end{cases}\tag{21}$$

式中,$k_0=1.0\sim1.5$;$k_1=3.0\sim4.5$;v 为残差。

这种方法主要是处理数据中的离群值,而当误差小于 2～3 个标准差时,抗差估计方法就难以处理这种情况。较小的误差对结果的影响较小,但如果这种误差数量较多,在误差传递的影响下,也会对结果造成较大影响,特别是在重力点位较

多的情况下。为此，本文提出 2 种重力平差的优化方法。

3 重力平差优化方法

3.1 多次段差平差

在拟合漂移率之后进行平差得到的每个站点数值与真实值之间仍然存在一定误差，这主要是因为现有仪器的漂移率不稳定，同时由于测量过程中外部环境的影响，测量值会出现一定偏差，进行漂移拟合无法得到这部分影响结果，这种误差属于非随机误差，且数量较多，误差较小。本文使用段差的段差乃至更高次的段差进行平差，这种多次段差相减理论上可以在一定程度上消除部分误差。在漂移校正之后使用多次段差进行平差能够消除部分通过漂移拟合无法消除的误差影响，使得平差后的重力值更接近实际值。

一次段差平差方程为：

$$\nabla g_{AB} = g(\vec{r}_B) - g(\vec{r}_A) + \varepsilon_{AB} \tag{22}$$

二次段差平差方程为：

$$\nabla g_{ABC} = (g(\vec{r}_C) - g(\vec{r}_B)) - (g(\vec{r}_B) - g(\vec{r}_A)) + \varepsilon_{ABC} \tag{23}$$

$N-1$ 次段差平差方程为：

$$\nabla g_{ABCD\cdots N} = \nabla g_{BCD\cdots N} - \nabla g_{ABCD\cdots M} + \varepsilon_{ABCD\cdots N} \tag{24}$$

同样生成矩阵之后按照最小二乘法求解得到平差之后的重力值：

$$\boldsymbol{X} = (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{L} \tag{25}$$

图 4 为同样将站点 1 设置为基准站，分别使用多次段差平差和漂移拟合后平差的结果。可以看出，在前半部分基站中，多次段差平差结果与真实值的偏差更小，优于漂移拟合后平差方法。而在后半部分基站中，多次段差平差结果与真实值的偏差更大，劣于正常平差方法。上述结果表明，使用多次段差来减少部分观测误差是可行的，站点 28 之前的结果普遍更优，而之后的结果由于多次段差平差方程含有更多未知量，使得站点 28 之后的结果误差积累更多，普遍劣于漂移拟合后平差方法。可以预测的是，如果使用更高次的段差进行平差，误差积累会更快。这种方法可在一定程度上对结果进行优化，但整体效果一般，为进一步优化平差结果，提出另一种方法进行平差。

3.2 约束线性规划平差

为优化平差结果，考虑在平差方程中增加带约束的误差项来抑制误差传递，表达式为：

$$\varepsilon_{AB} = \nabla g_{AB} - (g(\vec{r}_B) - g(\vec{r}_A) + f_{AB}), \quad -a \leqslant f_{AB} \leqslant a \tag{26}$$

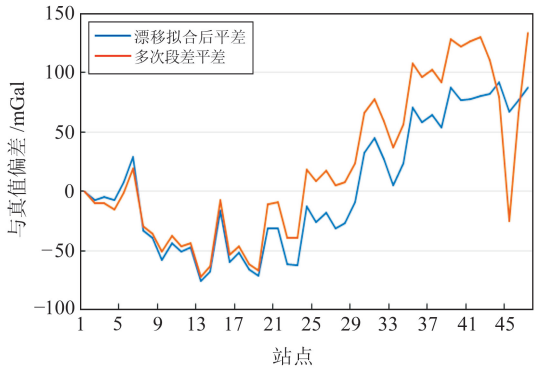


图 4 多次段差平差和漂移拟合后平差对比

Fig. 4 Comparison of multiple segment adjustment and drift fitting adjustment

式中，f_{AB} 为 2 点重力值段差与观测重力段差的误差项；a 为给定的误差限数值。在平差过程中需要约束 f_{AB} 值，由于 f_{AB} 误差不会太大，可以在 1 个标准差以内或更小，但由于误差累积，B 和 C 站点间的误差项 f_{BC} 的约束值可以更高，向误差传递方向依次增加约束项的大小。由上述讨论可知，平差结果与基准站的设置有一定关系，与基准站相近的站点平差结果更好（准确地说是站点与基准站之间间隔的站点数量，相隔站点使得其与基准站之间存在间接段差，间接次数代表其与基准站的远近，会影响平差结果）。因此，约束不同段差中误差项要根据和基准站段差的间接次数来确定，间接次数越高，则约束值也越高。

最终确定每个段差误差项的约束范围，然后生成矩阵：

$$\begin{cases} \boldsymbol{L} = \boldsymbol{A}_f\boldsymbol{X}_f + \boldsymbol{V} \\ \boldsymbol{a} \leqslant \boldsymbol{X}_f \leqslant \boldsymbol{a} \end{cases} \tag{27}$$

式中，$\boldsymbol{A}_f$ 为包含误差项的系数矩阵；$\boldsymbol{X}_f$ 为包含误差项未知数的矩阵；$\boldsymbol{a}$ 为不同误差项的上下限矩阵。从数学上来讲，这是一个典型的线性规划问题，根据上述方程使用线性规划内点法进行求解，采用 MATLAB 中的线性规划求解器进行计算。本文将该方法称为约束线性规划平差。

图 5 为约束线性规划平差与漂移拟合后平差结果对比，可以看出，前者的平差值优于后者，说明在平差方程中增加约束量 f 可以消除部分误差，使平差结果更好。

如果将站点 1 和站点 47 都设置为基准站之后进行平差，可以得到部分约束平差结果，整体上优于普通平差方法。将站点 1 和站点 47 设置为基准站，考虑不同约束方法对结果的影响，结果见图 6。图中，约束 5、30 是指将靠近基准站的段差误差约束为 ± 5 μGal，远离基准站的约束项设置为 ± 30 μGal；约束 5 和约束 15 分别指将所有误

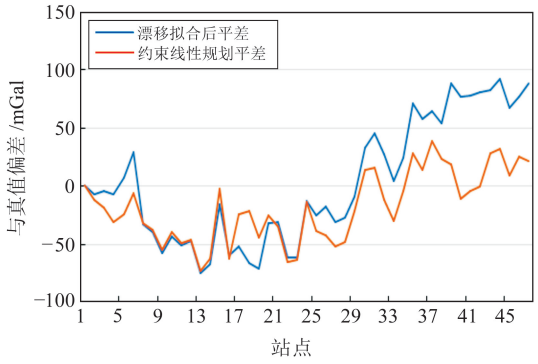


图 5　线性规划平差和漂移拟合后平差对比
Fig. 5　Comparison of linear programming adjustment and drift fitting adjustment

差项约束为±5 μGal 和±15 μGal 以内。可以看出,约束 5、30 的平差效果最好,这主要是因为靠近基准站的误差较小,而远离基准站的误差由于累积作用会变大。这也可以验证前文关于误差积累解释实验数据的观点的正确性。

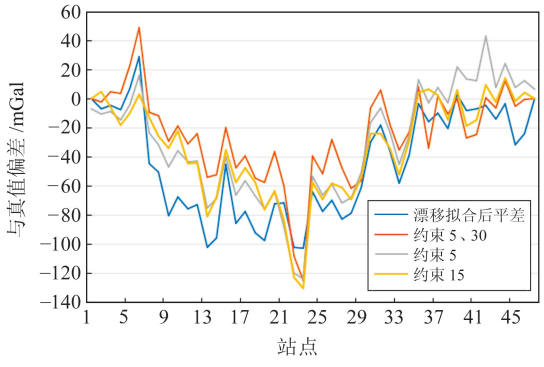


图 6　双基站不同约束线性规划平差和漂移拟合后平差对比
Fig. 6　Comparison of linear programming adjustment with different constraints and drift fitting adjustment for dual base stations

4　大别山实测数据对比

为进一步验证约束线性规划平差方法抑制误差传递的有效性和普遍性,选取大别山金寨重力测量数据[11]进行平差对比。该数据由 2 台 CG6 型相对重力仪和 1 台 FG5 绝对重力仪测量获得,包含 3 个重力基准控制点,总共 12 个测点。

为测试约束线性规划平差方法抑制误差传递的能力,将 3 个基准点平差结果作为“真值”,对比传统平差方法单基准平差结果和约束线性规划单基准平差结果与“真值”之差,结果见图 7。由图可知,约束线性规划单基准平差结果相比传统方法单基准平差结果整体更优,与真值的偏差更小,仅在 R001 和 A003 点偏差更大(表 2)。这主要是因为误差在传递过程中有正有负,使得部分站点误差相互抵消,这种情况在前文已讨论过。

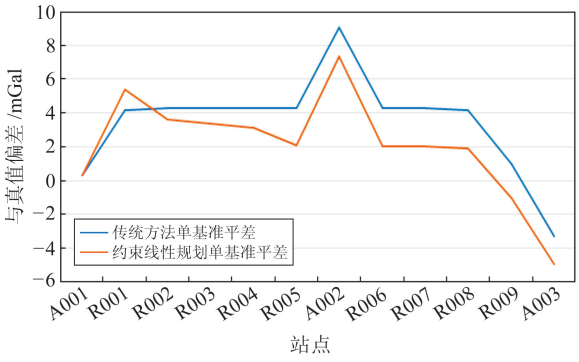


图 7　大别山实测数据对比
Fig. 7　Comparison of measured data of Dabie mountains

使用约束线性规划单基准平差法整条测线的平均误差是 3.1 μGal,而使用传统方法单基准平差法整条测线的平均误差为 4.0 μGal。上述分析表明,线性规划约束平差法可通过抑制误差传递来优化平差结果。

表 2　大别山实测数据对比
Tab. 2　Comparison of measured data of Dabie mountains

站点名	传统方法单基准平差结果/μGal	约束线性规划单基准平差结果/μGal
A001	0.3	0.3
R001	4.2	5.4
R002	4.3	3.6
R003	4.3	3.3
R004	4.3	3.1
R005	4.3	2.1
A002	9.1	7.3
R006	4.3	2.0
R007	4.3	2.0
R008	4.2	1.9
R009	1.0	−1.0
A003	−3.3	−4.9

5　结　语

相对重力平差中主要是采取相对重力值段差进行平差,需要引入基准站点来得到最终结果,因此基准站点的选取在一定程度上会影响最终平差结果。这主要是因为通过段差去得到其他站点值的过程中会造成误差累积,使得与基准站相近的站点的准确度更高,而相距较远站点的准确度会呈现逐渐减小的趋势。因此,基准站应尽可能均匀地分布在整个测网中,这样平差结果准确度会更高。使用多次段差平差可以优化部分平差结果,在某些特殊情况下可能会发挥作用。使用约束线性规划平差可以全面优化平差结果,抑制误差传递,得到更准确的重力值。但该方法无法对每一个结果进行优化,会存在少数站点重力值出现负优化的情况。

致谢:感谢安徽省地震局徐如刚高级工程师提供大别山金寨重力基线场观测数据。

参考文献

[1] 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(增 1):68-74(Li Hui, Liu Dongzhi, Liu Shaofu. Integrated Adjustment Models for the Seismic-Gravity Network[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1991, 11(S1):68-74)

[2] 隗寿春,徐建桥,郝洪涛,等. 零漂改正对中国地壳运动观测网络重力数据处理的影响[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(4):403-406(Wei Shouchun, Xu Jianqiao, Hao Hongtao, et al. Impacts of Zero Drift Correction in CMONOC Data Processing[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(4): 403-406)

[3] Chen S, Zhuang J C, Li X Y, et al. Bayesian Approach for Network Adjustment for Gravity Survey Campaign: Methodology and Model Test[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(5): 681-700

[4] 王林海. 地震重力数据贝叶斯平差模型设计与应用研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2022(Wang Linhai. Design and Application of Bayesian Adjustment Model for Seismic Gravity Data[D]. Beijing: Institute of Geophysics, CEA, 2022)

[5] Kennedy J R, Ferré T P A. Accounting for Time-and Space-Varying Changes in the Gravity Field to Improve the Network Adjustment of Relative-Gravity Data[J]. Geophysical Journal International, 2015, 204(2): 892-906

[6] 梁霄,徐如刚,林承灏,等. CG-5 型重力仪漂移特性与分时段平差处理[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(6):655-660(Liang Xiao, Xu Rugang, Lin Chenghao, et al. Drift Characteristics of CG-5 Gravimeter and the Method of Time-Division Adjustment[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(6): 655-660)

[7] 郝洪涛,李辉,孙和平,等. CG-5 重力仪零漂改正及格值系数检测应用研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2016,41(9):1265-1271(Hao Hongtao, Li Hui, Sun Heping, et al. Application of Zero Drift Correct and Detection of Scale Parameters of CG-5 Gravimeter[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(9):1265-1271)

[8] 马下平,杨梅,景慧,等. 经典测量平差中基本模型和通用模型的参数估计及相互转换[J]. 北京测绘,2023,37(1):110-114(Ma Xiaping, Yang Mei, Jing Hui, et al. Parameter Estimation and Mutual Transformation of Basic Model and General Model in Classical Surveying Adjustment[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2023,37(1):110-114)

[9] 黄维彬. 测量平差的当代进展:近代测量平差[J]. 测绘通报,1994(2):3-9(Huang Weibin. Contemporary Progress in Survey Adjustment: Modern Survey Adjustment[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 1994(2): 3-9)

[10] 李琦,武威. IGG Ⅲ选权迭代法的重力网抗差估计[J]. 地理空间信息,2022,20(10):151-154(Li Qi, Wu Wei. IGG Ⅲ Selection Weight Iteration Method in Robust Estimation for Gravity Network[J]. Geospatial Information, 2022, 20(10): 151-154)

[11] 徐如刚,张新林,梁霄,等. 大别山金寨重力基线场混合重力测量试验与分析[J]. 地震地质,2023,45(5):1147-1169(Xu Rugang, Zhang Xinlin, Liang Xiao, et al. Analysis for Synthetic Adjustment of Absolute and Relative Gravity of Jinzhai Gravity Baseline in Dabie Mountain[J]. Seismology and Geology, 2023, 45(5): 1147-1169)

Optimization of Relative Gravity Adjustment Algorithm

ZHOU Tianxiang[1] *YANG Guangliang*[1,2] *TAN Hongbo*[1,2] *WANG Jiapei*[1,2] *CHEN Ziheng*[1]
ZHANG Minghui[1,2] *QIN Haitao*[1] *LIU Sheng*[1] *MENG Hengzhou*[1]

1 Institute of Seismology, CEA, 40 Hongshance Road, Wuhan 430071, China
2 Hubei Earthquake Agency, 48 Hongshance Road, Wuhan 430071, China

Abstract: By comparing the differences between various drift models and adjustment methods through simulated gravity data adjustment, certain optimizations were made to the gravity adjustment algorithm. Methods for multiple segment difference adjustment and constrained linear programming adjustment were proposed. The results indicate that the multiple segment adjustment method outperforms other adjustment methods in some aspects, while the constrained linear programming adjustment method demonstrates overall superiority over other adjustment methods.

Key words: mobile gravity observation; gravity adjustment; instrument drift; algorithm optimization; segment difference

Foundation support: National Natural Science Foundation of China, No. 42174104, U1939204; Special Fund for Technological Basic Resources Investigation of the Ministry of Science and Technology, No. 2023FY10150502; Natural Science Foundation of Hubei Province, No. 2022CFB350; The Spark Program of Earthquake Technology of CEA, No. XH23014YC.

About the first author: ZHOU Tianxiang, postgraduate, majors in gravity-related algorithm, E-mail: zhoutianxiang24@mails.ucas.ac.cn.

Corresponding author: TAN Hongbo, associate researcher, majors in gravity and tectonic activity inversion, E-mail: thbhong@163.com.