

航空重力测量重复测线数据处理技术研究



李新宇,周召发,张志利,常振军,郝诗文

火箭军工程大学 兵器发射理论和技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025

摘 要:航空动态重力测量是快速获取地球重力场信息的有效手段,从广泛噪声中高精度提取重力信息的数据处理技术是重力测量的关键环节。本文首先分析了测量噪声的来源及误差特性,且明确了现阶段常用的有限冲激响应(FIR)低通滤波器可以有效滤除高频噪声。其次,针对动态特性误差和偶然误差,提出基于经验模态分解(EMD)的误差分离方法。再次,提出了适用于多条重复测线的系统平差方法,有效抑制了低频系统误差的影响。最后,对航空实测数据进行了处理。试验结果表明,基于EMD的误差分离方法将内符合精度从2.86mGal提升至0.75mGal,重复测线系统平差方法将精度进一步提升至0.28mGal。该研究对提升航空重力测量系统在数据处理技术成熟度及实用化水平方面有重要意义。

关键词:航空重力测量; 数据处理; 经验模态分解; 系统平差; 重复测线

中图分类号:U666.1

文献标识码:A

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2023.12.011

以飞机为载体的航空重力测量技术已成为高效测定地球重力场信息的主要手段^[1]。在动态重力测量中,测量结果会受到发动机振动、载体动态性、空气扰动等因素的干扰,测量噪声广泛分布,严重影响了重力测量的精度^[2]。开展航空重力测量数据处理方法研究,提高数据处理的精度,具有十分重要的意义。

为了抑制噪声对实现重力信息的高精度提取的影响,众多学者对航空重力数据后处理进行了深入研究。频域有限冲激响应(FIR)低通滤波方法在实际中被广泛应用,可以有效消除高频噪声^[3]。国外提出了具有特色的滤波方法,如R. R. B. Von Frese等^[4]提出了波数相关滤波器(WCF),通过比较测量数据与协同数据频谱的相关程度来实现噪声分离;B. A. Alberts等^[5]提出了频域加权的方法,对测量数据的不同频段赋予不同的权值,以此来进行降噪处理;Y. V. Bolotin等^[6]在时域处理方法的基础上,将地球重力场的非均匀一致性建模为多状态隐性马尔可夫模型,对结果的细节有所提升。国内方面,罗锋等^[7]提出使用Kalman平滑算法开展航空重力测量数据处理方法研究,在国内首次解算出稳定平台式航空重力异常数据,且

数据处理精度达到国际先进水平。参考文献[8]将经验模态分解应用到航空重力测量数据处理中,对已经过FIR低通滤波的航空重力测量数据进行深化处理,可以很好地消除由飞机动态运动引起的动态误差,进一步提高测量精度。针对一直存在的动态效应剩余影响,黄漠涛等^[9]基于AIC信息量准则和互相关分析方法提出了一种针对各类动态效应剩余误差的通用补偿模型,内符合精度从原来的9.35mGal提升到1.01mGal。为了削弱各类误差源的影响,欧阳永忠等^[10]提出了一种相关分析法和测线网平差两阶段综合误差补偿方法,实测数据处理结果验证了该方法的有效性和可靠性。

通过测线网平差求解系统误差改正量,对各测线重力测量值进行补偿是处理航空重力测量数据的重要方法^[11],但现阶段平差方法往往仅适用于规则的测线网^[12]。航空重力测量中常常采用重复测线的测量方式来检验航空重力仪动态测量的重复一致性,此时测线网平差的方法便不再适用^[13]。蔡劭琨等^[14]提出了一种航空重力测量重复测线系统误差自调整的方法,也仅仅可以解决两条重复测线的数据处理,怎样对多条重复测线进行系统平差还需要继续深入研究。

收稿日期: 2023-07-21; 退修日期: 2023-10-09; 录用日期: 2023-11-08

基金项目: 航空科学基金(201808U8004)

引用格式: Li Xinyu, Zhou Zhaofa, Zhang Zhili, et al. Research on data processing technology for repeated survey lines in aerial gravity measurement[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(12): 93-99. 李新宇, 周召发, 张志利, 等. 航空重力测量重复测线数据处理技术研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(12): 93-99.

因此,本文提出了基于经验模态分解(EMD)和半系统误差调整的航空重力测量重复测线数据处理方法。首先,推导了航空重力测量的基本原理,并详细分析了测量噪声的来源及误差特性。其次,提出了基于EMD的误差分离方法,对航空重力测量数据的深化处理进一步提高动态重力测量的精度。最重要的是,基于半系统误差调整模型提出了适用于多条重复测线的系统平差方法,填补了该领域的研究空白。最后,通过对实测数据的处理,验证了本文所提数据处理方法的精度和有效性。

1 航空重力测量数学模型

航空重力测量的两个基本问题是如何保持重力传感器的稳定指向及如何从惯性加速度中分离出重力加速度^[15]。平台式重力仪基于跟踪当地地理系的稳定平台,可以隔绝载体角运动的影响,可以有效解决第一个问题。第二个问题的解决依赖于差分GPS,由其可以获取高精度的位置和速度信息,用以计算载体垂向加速度以及重力相关的改正项,进而分离得到重力信息。

1.1 数学原理

式(1)所述的比力方程是动态重力测量和惯性导航系统共同的理论基础

$$\dot{v}_e^n = f^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v_e^n + g^n \quad (1)$$

式中, g^n 为导航系下的重力矢量; v_e^n 和 $\dot{v}_e^n$ 分别为载体速度和载体加速度; f^n 为 n 系中比力测量矢量; ω_{ie}^n 为地球自转角速度在 n 系下的投影; ω_{en}^n 为 n 系相对 e 系的转动角速度。重力矢量 g^n 可以表示为正常重力矢量 γ^n 与重力扰动矢量 δg^n 之和,因此航空重力测量的基本模型为

$$\delta g^n = \dot{v}_e^n - f^n + (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v_e^n - \gamma^n \quad (2)$$

本文研究的是重力异常时重力扰动矢量垂向分量的数据处理技术,则标量重力测量基本方程为

$$\delta g = f - \ddot{h} - \gamma + 2V_E \omega_{ie} \cos \varphi + \frac{V_E^2}{R_N + h} + \frac{V_N^2}{R_M + h} \quad (3)$$

式中, δg 为重力异常; f 为重力传感器测量得到的比力; h 为载体高度信息; $\ddot{h}$ 为载体垂向加速度; γ 为正常重力矢量的垂向分量; ω_{ie} 为地球自转角速度; V_E , V_N 分别为载体相对于地球的东向和北向速度; φ 为载体纬度信息; R_N , R_M 分别为地球参考椭球的卯酉圈和子午圈的曲率半径;后三项合记为厄特弗斯改正项 δa_E 。

除厄特弗斯改正项外,航空重力测量还涉及正常重力改正、空间改正、偏心改正、水平加速度改正及垂直加速度改正等多个改正项。

1.2 噪声误差源分析

以飞机为载体的航空动态重力测量数据受到大量具有不同频谱特性且分布广泛的噪声影响,本节依据噪声特性进行分类简述。

1.2.1 高频噪声

在实际航空重力测量中,重力敏感器的输出包含由飞机发动机以及空气湍流造成的随机振动加速度,这部分噪声的强度是重力异常的数万倍,属于高频噪声。因此,需要利用低通滤波的方法进一步去除重力异常信息中的高频噪声。

1.2.2 未知特性噪声

测量条件中各种随机因素产生的偶然误差具有偶然性和随机性,由载体动态性、空气扰动等因素产生的噪声也无法明确其误差特性。基于经验模态分解的数据深化处理是消除这些误差的有效方法。

1.2.3 低频误差

受测量条件中某些特定因素如长周期传感器误差的系统性影响而产生的低频误差被称为系统误差,其与重力信息在同一频段,无法通过低通滤波予以消除。系统误差对观测成果具有累积作用,因此在测量过程中常使用平差方法予以消除。

2 基于EMD的误差分离

构建补偿模型是抑制重力测量动态效应影响的一种方法,但模型构建的科学性及模型参数的准确性严重制约上述方法的有效性。基于数据处理的误差分离是另一种有效的抑制方法。本节提出EMD对已经低通滤波过后的航空重力测量数据进行深化处理,削弱未知特性噪声对重力测量结果的影响,进一步提高动态重力测量的精度。

2.1 EMD基本原理

EMD方法认为,任何复杂的时间序列 $x(t)$ 都可以分解为一组从高频到低频的本征模态函数(IMF)和一个残余信号 $r(t)$,这些本征模态函数可以很好地反映信号在任何时间局部的频率特征^[16]。分解结果如式(4)所示

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \text{IMF}_i + r(t) \quad (4)$$

每个IMF分量都满足两个条件:一是整个信号上极值点数目与零点数目相差为1;二是极大值与极小值分别构成的包络线均值为0。EMD的分解步骤为:(1)确定原序列 $x(t)$ 中的极大值和极小值点,并采用三次样条分别对极大值和极小值点进行插值,构造上下包络线 $x_{\max}(t)$ 和 $x_{\min}(t)$,可得上下包

络线的均值为 $m(t)$; (2) 计算原时间序列与包络线均值序列的差值为 $h(t) = x(t) - m(t)$; (3) 若 $h(t)$ 满足 IMF 的两个基本条件, 则将 $h(t)$ 设定为一个 IMF 分量, 并求出剩余分量 $r(t) = x(t) - h(t)$, 继续执行步骤 (4); 若不满足, 将 $h(t)$ 替代 $x(t)$ 返回执行步骤 (1)~(3); (4) 将 $r(t)$ 作为新的序列重复执行步骤 (1)~(4); 循环执行直到提取的最后一个 IMF 分量或者余项小于预先设定的阈值或已成为单调函数即可结束算法。

2.2 误差分离

基于 EMD 对航空重力测量数据进行深度处理的误差分离, 首先对低通滤波后去除高频噪声的重力数据进行 EMD 分解, 而后根据重力数据与 IMF 分量的相关性进行筛选并重构得到去噪后的信号。误差分离的流程如图 1 所示。

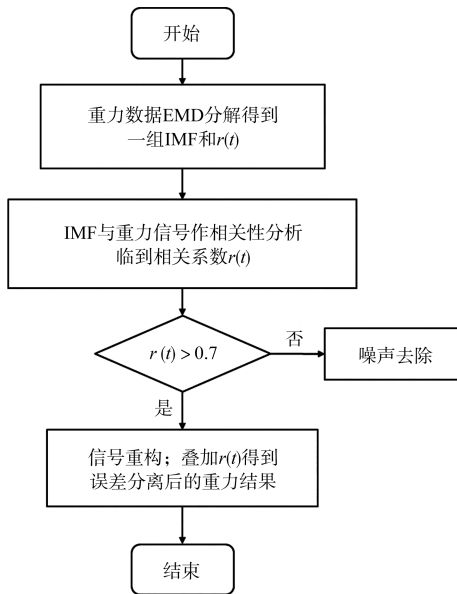


图1 基于EMD的误差分离流程

Fig.1 Error separation flowchart based on EMD

若 IMF 分量与重力数据的相关系数 $r(t) > 0.7$, 则认定为强相关; 若 $0.2 < r(t) < 0.7$, 则为弱相关; 若 $r(t) < 0.2$, 则认为是无相关。本文设定重构信号的阈值为 0.7。

3 重复测线系统误差调整

航空重力测量中各条重复测线在同一测点上的重力异常值理论上应该是相同的, 但由于受到系统误差的影响, 实际测量值并不相等, 存在测点不符值。本节基于测区半系统差调整的算法提出适用于重复测线的平差方法, 对测点数据进行补偿, 抑制系统误差的影响。

n 条重复测线上各选取 m 个测点进行平差计算, 重复测

线上重力测量值分别为 $g_{1j}, g_{2j}, \dots, g_{nj}$, 其中 j 表示某一测点, 且 $j \in [1, m]$ 。将上述测量值用以下模型表示。

$$\begin{aligned} g_{1j} &= g_0 + \varepsilon_{1j} + \Delta_{1j} \\ g_{2j} &= g_0 + \varepsilon_{2j} + \Delta_{2j} \\ &\dots \\ g_{nj} &= g_0 + \varepsilon_{nj} + \Delta_{nj} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, g_0 是 j 测点上的重力真值; ε_{ij} 和 Δ_{ij} 分别表示测线 1~ n 上的系统误差和随机误差。对 n 条测线上的重力测量值计算均方误差, 其中测线 i 的均方误差计算式为

$$\text{RMSE}_i = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(g_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m g_{ij} \right)^2} \quad (6)$$

选取均方误差最小的测线上的测量值为重复测线的重力基准值 $\bar{g}_{ij}$ 。因此可得 n 条重复测线 j 测点上的重力不符值为

$$d_{ij} = g_{ij} - \bar{g}_{ij} \quad (7)$$

而后对其余 $(n-1)$ 条测线进行一次测线系统差调整, 则测点重力不符值变为

$$\bar{d}_{ij} = d_{ij} - \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} d_{ij} \quad (8)$$

除去基准测线外的 $(n-1)$ 条重复测线测点不符值的均值作为该测点的总体不符值, 并以该值作为平差的指标, 迭代计算至测点总体不符值代数和为 0 时结束调整, 并按照该方法遍历重复测线上所有测点即可完成重复测线的系统平差处理。

4 实测数据分析

在某次航空重力测量中 4 条重复测线上获得的重力异常结果如图 2 所示, 所示结果已通过相同的 FIR 低通滤波器将高频噪声滤除。由图 2 可以看出, 重力异常数据低通滤波后相对平滑, 高频噪声滤除效果较好, 但仍然存在明显的振荡和测点不符值, 计算得到内符合精度为 2.62mGal。

4.1 EMD 分解

前文已经介绍了 EMD 分解的原理, 下面首先对重复测线 1 的重力异常结果进行 EMD 分解, 得到如图 3 所示的分解结果。进行相关性分析后选择相关系数大于 0.7 的 IMF 分量对重力异常信息进行重构, 得到 EMD 去噪前后重力异常结果对比图, 如图 4 所示, 可知 EMD 深化处理后重力异常结果中的振荡得到了很好的分离。

使用同样的方法对其他测线进行 EMD 分解并重构, 得到 EMD 深化处理后的重复测线重力异常测量结果, 如图 5 所示。重复测线数据 EMD 处理后消除了原有明显的振荡,

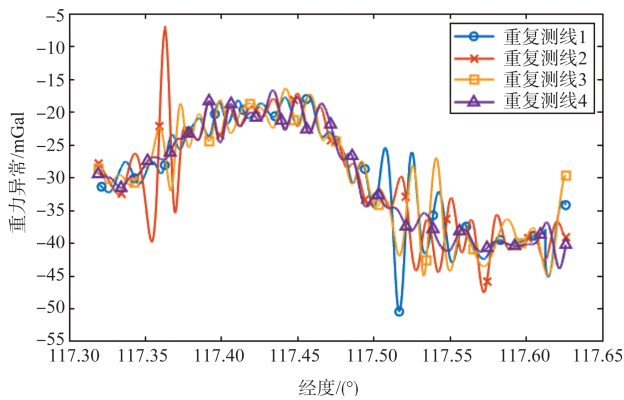


图2 重复测线重力异常结果图

Fig.2 Gravity anomaly result map of repeated survey lines

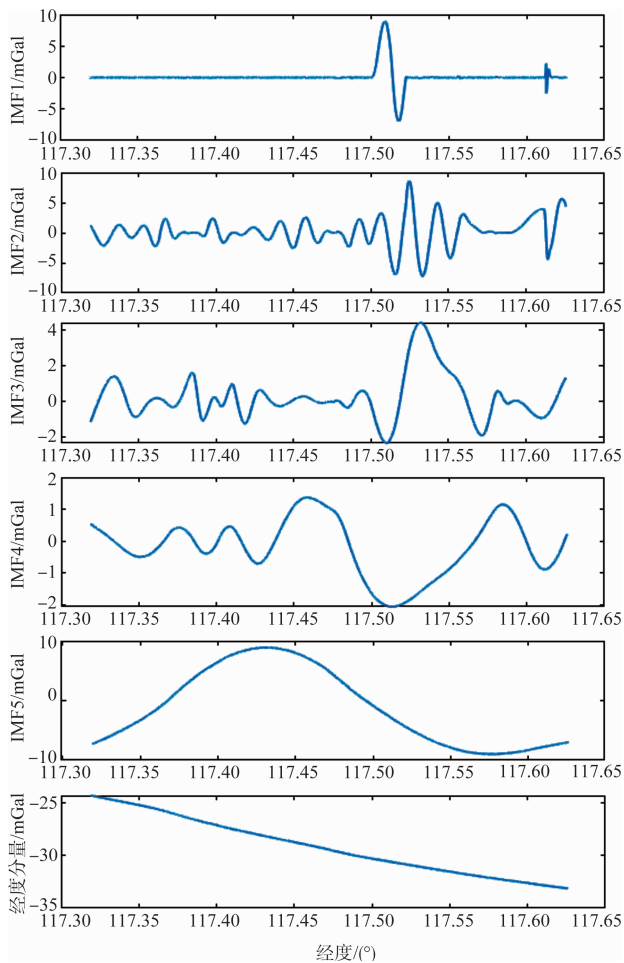


图3 reline1 重力异常结果EMD分解结果图

Fig.3 EMD decomposition result diagram of reline1 gravity anomaly results

计算可得内符合精度为0.75mGal,但测点不符值依然存在,有待进一步平差处理。

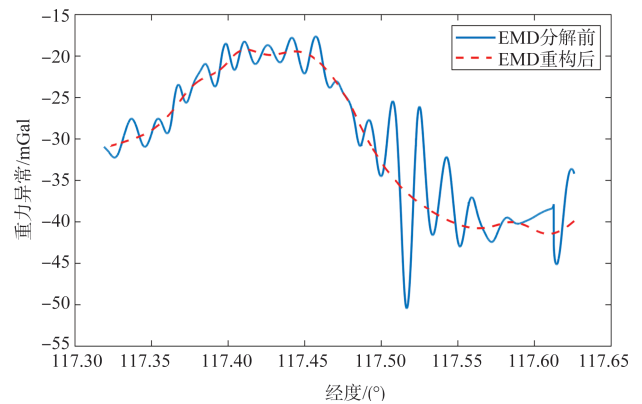


图4 reline1 重力异常数据深化处理前后对比

Fig.4 Comparison between reline1 gravity anomaly data before and after deepening processing

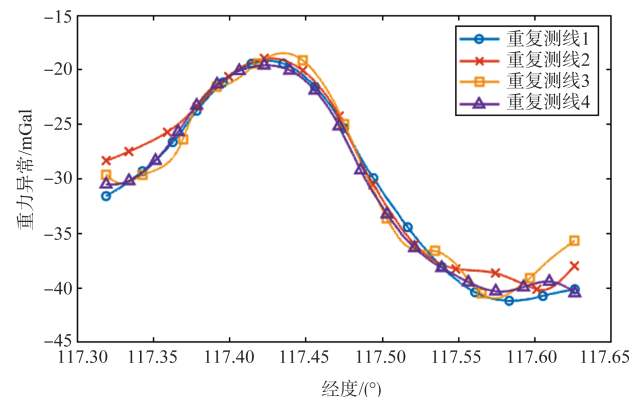


图5 EMD去噪后的重复测线重力异常结果图

Fig.5 Gravity anomaly results of repeated survey lines after EMD denoising

4.2 重复测线平差调整

在重复测线上等间隔选取756个测点,按照前文设计的重复测线平差算法进行系统误差调整。本文设计的系统平差算法精度与平差次数呈正相关,两者的相关关系如图6所示。由图6可知,迭代计算至第16次后测点不符值精度已收敛,756个测点不符值代数和以及标准差基本为0,此时认为平差结束。

平差结束后的重复测线重力异常结果如图7所示,相较于平差前的结果,单个测点的不符值仍然存在,似乎表示该算法的优化作用不是特别明显,但通过计算可知,此时重复测线的内符合精度提升至0.28mGal,相较于平差前的0.75mGal已有大幅提升。这是因为本文所提的重复测线平差方法是针对总体测线而言的,因此重复测线总体的内符合精度提升较为明显。

图8给出了平差前后测点不符值的分布情况。显而易

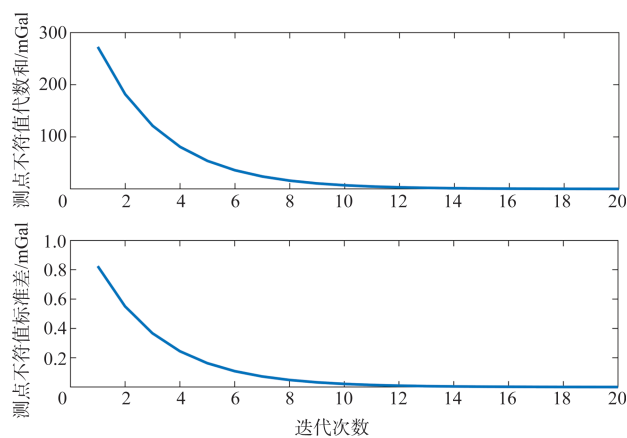


图6 平差算法精度与平差次数关系图

Fig.6 Relationship between adjustment algorithm accuracy and adjustment times

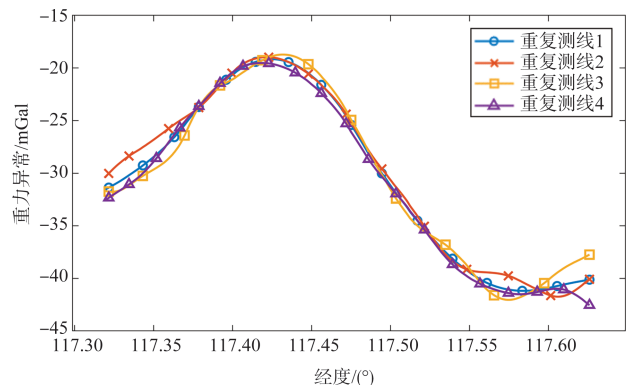


图7 平差后重复测线重力异常结果图

Fig.7 Gravity anomaly results of repeated survey lines after adjustment

见,平差结束后测点不符值误差明显减小,系统误差得到有效补偿。且测点不符值分布大致满足标准正态分布,说明了各测点之间相互独立。

4.3 结果分析

基于EMD分解有效分离了信号与误差,本文提出的重复测线平差方法在总体上对系统误差进行调整,进一步提高了总体测线的内符合精度。重复测线内符合精度统计见表1,由此可知本文的研究内容显著提升了数据处理的精度。

5 结论

本文针对航空动态重力测量噪声分布广泛的问题,对重复测线的误差分离展开研究,提出了基于EMD和半系统误差调整的航空重力测量重复测线数据处理方法。实测数

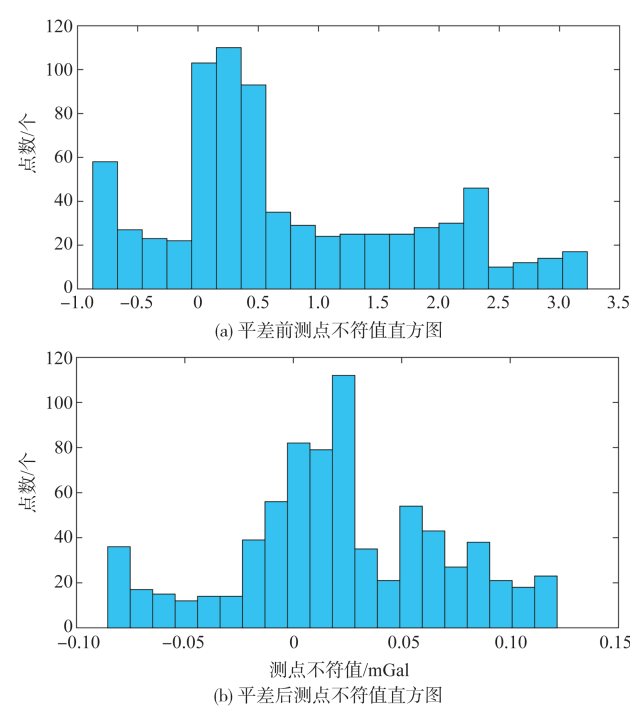


图8 平差前后测点不符值分布图

Fig.8 Distribution map of inconsistent values of measurement points before and after adjustment

表1 重复测线内符合精度统计

Table 1 Statistical table of inner coincidence accuracy of repeated lines

类 别	原始 重力数据	EMD 误差分离	EMD误差分离+ 系统平差
内符合精度/mGal	2.62	0.75	0.28

据的处理结果表明,EMD的深化处理将内符合精度从2.62mGal提升至0.75mGal,有效分离出噪声的影响;经平差处理后抑制系统误差的影响,内符合精度进一步提升至0.28mGal,精度依次提升了71.37%和62.67%。本文研究内容对进一步推动航空动态重力测量精度提升和工程应用化具有积极意义。

AST

参考文献

[1] 刘站科. 航空重力测量技术及应用研究[J]. 测绘学报, 2021, 50(2):284.
Liu Zhanke. Research on airborne gravity survey technology and application[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(2):284.(in Chinese)
[2] Wang Minghao, Wu Meiping, Cao Juliang, et al. Strapdown airborne gravimetry quality assessment method based on single

- survey line data: A study by SGA-WZ02 Gravimeter [J]. *Sensors*, 2018,18(2): 360-316.
- [3] 相倩,余启梁,王钢林,等. 不同翼型厚度和来流马赫数下的桨涡干扰噪声分析[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(6):11-19.
- Xiang Qian, Yu Qiliang, Wang Ganglin, et al. Analysis on rotor vortex interference noise under different airfoil thickness and free- stream mach number [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023,34 (6):11-19.(in Chinese)
- [4] Von Frese R R B, Tan L, Potts L V, et al. Lunar crustal analysis of mare orientale from topographic and gravity correlations[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1997, 102(E11): 25657-25675.
- [5] Alberts B A, Klees R, Ditmar P. A new strategy for processing airborne gravity data[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [6] Bolotin Y V, Doroshin D R. Adaptive filtering of airborne gravimetry data using hidden Markov models[J]. *Moscow University Mechanics Bulletin*, 2011,66(3):63-68.
- [7] 罗锋,王冠鑫,周锡华,等. 三轴稳定平台式航空重力测量数据处理方法研究与实现[J]. *物探与化探*, 2019, 43(4):872-880.
- Luo Feng, Wang Guanxin, Zhou Xihua, et al. Research and implementation of data processing method for the three-axis stabilized platform airborne gravity measuring system[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(4): 872-880. (in Chinese)
- [8] 邹欣蕾,蔡劭琨,吴美平,等. 基于经验模态分解的航空重力测量动态误差分离[J]. *物探与化探*, 2016, 40(6):1217-1221.
- Zou Xinlei, Cai Shaokun, Wu Meiping, et al. Dynamic errors separation of airborne gravi- metry based on empirical mode decomposition[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016,40(6):1217-1221.(in Chinese)
- [9] 黄谟涛,陈欣,邓凯亮,等. 补偿海空重力测量动态效应剩余影响的通用模型[J]. *测绘学报*, 2020, 49(2):135-146.
- Huang Motao, Chen Xin, Deng Kailiang, et al. A general model for compensating remainder dynamic environment effect on marine and airborne gravimetry[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020,49(2):135-146.(in Chinese)
- [10] 欧阳永忠,陆秀平,黄谟涛,等. L&R海空重力仪测量误差综合补偿方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2011, 36(5): 625-629.
- Ouyang Yongzhong, Lu Xiuping, Huang Motao, et al. An integrated method for compensating the systematic errors of marine and airborne measurements from L&R gravimeter[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(5): 625-629.(in Chinese)
- [11] Glennie C, Schwarz K P. A comparison and analysis of airborne gravimetry results from two strapdown inertial/DGPS systems[J]. *Journal of Geodesy*, 1999,73: 311-321.
- [12] 马龙,郑彦鹏,华清峰,等. 海洋重力不规则测线网平差模型对比分析[J]. *海洋科学进展*, 2021, 39(2): 279-289.
- Ma Long, Zheng Yanpeng, Hua Qingfeng, et al. Adjustment model comparison of irregular surveying network of marine gravity[J]. *Advances in Marine Science*, 2021,39(2): 279-289. (in Chinese)
- [13] 郭志宏,熊盛青,周坚鑫,等. 航空重力重复线测试数据质量评价方法研究[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(5):1538-1543.
- Guo Zhihong, Xiong Shengqing, Zhou Jianxin, et al. The research on quality evaluation method of test repeats lines in airborne gravity survey[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008,51(5):1538-1543.(in Chinese)
- [14] 蔡劭琨,吴美平,张开东. 航空重力测量重复测线系统误差自调整[J]. *导航与控制*, 2009, 8(4):6-10.
- Cai Shaokun, Wu Meiping, Zhang Kaidong. The systematic error adjustment of repeat lines in airborne gravimetry[J]. *Navigation and Control*, 2009,8(4):6-10.(in Chinese)
- [15] 闫方,胡平华,赵明,等. 平台式重力仪航空重力测量数据后处理技术研究[J]. *导航定位与授时*, 2019, 6(3): 52-61.
- Yan Fang, Hu Pinghua, Zhao Ming, et al. Research on airborne gravity measurement data processing of inertial stabilized platform gravimeter[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2019,6(3): 52-61.(in Chinese)
- [16] 谷士鹏,常志远,马曼曼,等. 基于二维经验小波变换的金属断口图像消噪方法研究[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(10): 66-73.
- Gu Shipeng, Chang Zhiyuan, Ma Manman, et al. Research on denoising method of metal fracture image based on two-dimensional empirical wavelet transform[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(10):66-73.(in Chinese)

Research on Data Processing Technology for Repeated Survey Lines in Aerial Gravity Measurement

Li Xinyu, Zhou Zhaofa, Zhang Zhili, Chang Zhenjun, Hao Shiwen

State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China

Abstract: Aerodynamic gravity measurement is an effective means of quickly obtaining information about the earth's gravity field, and the data processing technology of high-precision extraction of gravity information from a wide range of noise plays an important role. This paper first analyzes the sources and error characteristics of measurement noise, and clarifies that commonly used FIR low-pass filters at present can effectively filter out high-frequency noise. Secondly, an error separation method based on Empirical Mode Decomposition (EMD) is proposed for dynamic characteristic errors and accidental errors. Then, a system adjustment method suitable for multiple repeated survey lines was proposed, which effectively suppresses the impact of low-frequency system errors. Finally, the measured aviation data is processed. The experimental results show that the EMD based error separation method improves the internal coincidence accuracy from 2.86mGal to 0.75mGal, and the repeated line system adjustment method further improves the accuracy to 0.28mGal. This study is of great significance for improving the maturity and practicality of airborne gravity measurement systems in data processing technology.

Key Words: aerial gravity measurement; data processing; empirical mode decomposition; system adjustment; repeated survey lines

Received: 2023-07-21; **Revised:** 2023-10-09; **Accepted:** 2023-11-08

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(201808U8004)