

doi: 10.11720/wtyht.2021.0017

罗锋,周锡华,胡平华,等.平台式航空重力勘查系统国产化研究[J].物探与化探,2021,45(5):1256-1265. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0017

Luo F, Zhou X H, Hu P H, et al. Research on localization of platform-based airborne gravity exploration system[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1256-1265. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0017

# 平台式航空重力勘查系统国产化研究

罗锋<sup>1,2</sup>, 周锡华<sup>1,2</sup>, 胡平华<sup>3</sup>, 姜作喜<sup>1,2</sup>, 王冠鑫<sup>1,2</sup>, 屈进红<sup>1,2</sup>,  
李行素<sup>1,2</sup>, 李兆亮<sup>1,2</sup>, 赵明<sup>3</sup>

(1. 自然资源部 航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083; 2. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 3. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

**摘要:** 针对深地资源勘探等应用对航空重力测量精度的要求, 在前期研究基础上, 研制并集成了平台式航空重力勘查系统。该系统为“三轴稳定平台+石英挠性摆式加速度计”的平台式航空重力仪, 重力仪采用自标定技术和平台姿态误差实时估计和修正技术, 并配备了导航定位系统、减振系统、无人值守系统和数据处理软件等。飞行测量数据表明: 平台式航空重力勘查系统多架次重复线飞行数据的内符合精度优于  $0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  (100 s), 测量精度达到国际先进水平, 可以实现航空重力测量技术装备国产化。

**关键词:** 平台式重力仪; 航空重力测量; FIR 低通滤波; 卡尔曼 (Kalman) 滤波

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2021)05-1256-10

## 0 引言

地球重力场不仅是大地测量学、地震学、海洋学、空间科学、地球物理学和现代国防科学等学科的基础, 同时也能为人类寻求资源、保护环境和预测灾害提供重要的信息资源。快速、高精度地测量地球重力场一直是重力测量技术的发展目标, 而航空重力测量作为一种快速动态测量技术是获得区域高精度、高分辨率重力场信息的有效手段, 特别是在沙漠、冰川、沼泽、海陆交互区等难以实施地面重力测量的地区具有显著优势<sup>[1-3]</sup>。

对航空重力测量技术的研究可以追溯到 20 世纪 50 年代, 但是受限于当时航空重力仪和导航系统的定位精度限制, 并未得到较好的成果。直到 20 世纪 80 年代, 随着全球定位系统的发展, 航空重力测量技术才取得突破, 先后发展出了基于不同原理的航空重力仪。目前航空重力测量系统主要有平台式和捷联式两大类, 其中平台式分为双轴稳定平台式

和三轴稳定平台式。基于双轴稳定平台的航空重力仪代表产品主要为美国 Micro-g 公司的 TAGS-6、DGS 公司的 AT1A、俄罗斯圣彼得堡科学研究中心电气仪表所的 Chekan-AM 海/空重力仪等, 测量精度在  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  左右。基于三轴稳定平台的航空重力仪代表产品主要有加拿大 Sander Geophysics Limited (SGL) 公司的 AIRGrav 航空重力仪和俄罗斯 GT 重力技术公司的 GT 系列航空重力仪, 已经得到商业化应用, 测量精度在  $0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  左右。基于捷联数学平台的航空重力仪代表样机主要有俄罗斯重力测量技术公司的 GT-X、加拿大 Calgary 大学的 SISG 和德国 iMar 公司等, 测量精度可接近  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 但到目前为止, 均没有形成商业化的产品<sup>[4-6]</sup>。

我国航空重力测量装备早期一直依赖于进口, 制约着航空重力测量技术的发展及大规模应用。在“十三五”国家重点研发计划等项目的支持下, 基于原来的研究基础, 中国自然资源航空物探遥感中心联合北京自动化控制设备研究所开展了平台式航空

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-06-16

基金项目: 国家重点研发计划课题“航空重力数据处理软件实用化研制”(2017YFC0601705); 中国自然资源航空物探遥感中心青年创新基金“磁日变数据质量可视化技术研究”(2020YFL09)

第一作者: 罗锋 (1979-), 男, 高级工程师, 从事航空地球物理勘探与方法技术研究工作。Email: Luofeng80@126.com

重力勘查系统的研制。该系统采用与国际上先进的 AIRGrav 重力仪一致的“三轴稳定平台+石英挠性加速度计重力传感器”方案<sup>[7]</sup>,利用自标定技术、平台姿态误差实时估计和修正技术等实用先进手段,加上测量数据精确同步对准和数千毫伽干扰下微弱重力信息提取等处理技术,提高了航空重力测量精度,使国产平台式航空重力勘查系统测量精度达到  $0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,并跑于国外先进水平。

## 1 平台式航空重力勘查系统组成

研制和集成的平台式航空重力勘查系统(如图 1)包括:平台式航空重力仪、DGNSS 卫星接收机系统、供电显控系统、减振系统和无人值守系统、数据处理软件等。

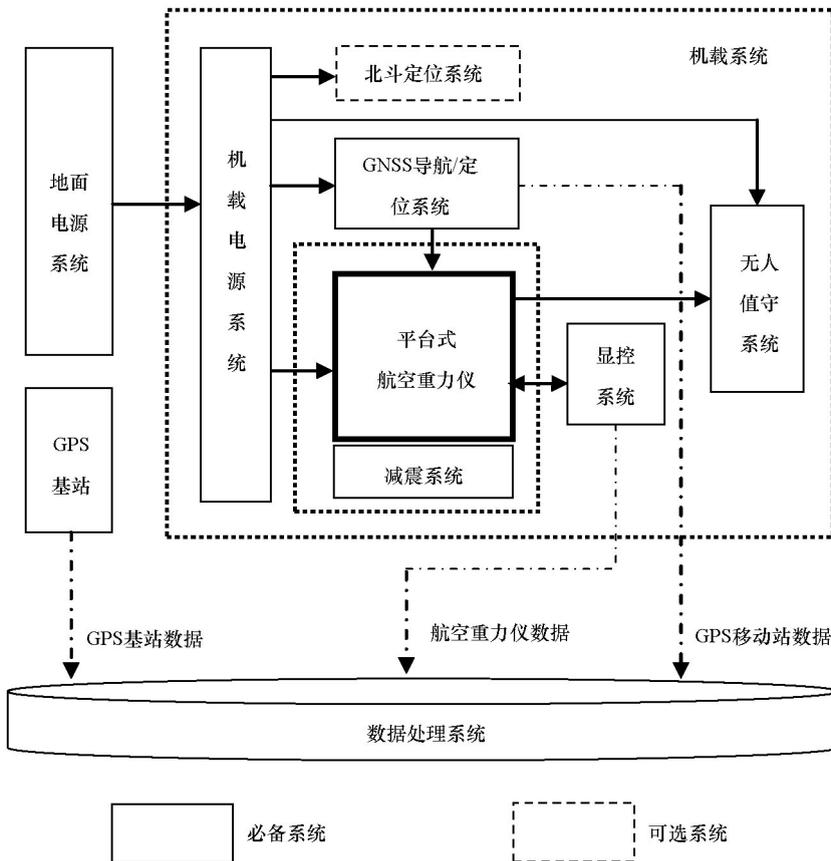


图 1 平台式航空重力勘查系统组成

Fig. 1 Composition diagram of platform-based airborne gravity exploration system

航空重力仪主要由三轴惯性稳定平台等构成。三轴惯性稳定平台为重力传感器提供高精度姿态基准,同时也作为重力传感器,测量地球重力场的变化。DGNSS 卫星接收机系统为载体提供高精度的位置信息,进而计算出载体的速度和加速度信息。航空重力数据处理系统实现测量数据对准和各项改正,再通过数据低通滤波技术提取出微弱重力信息,实现航空重力异常解算。

## 2 平台式航空重力仪实现实用化

平台式航空重力仪采用“三轴稳定平台+石英挠性摆式加速度计”的设计方案,利用 2 个二自由

度动力调谐陀螺和 3 个石英挠性加速度计构成三轴惯性稳定平台与重力测量装置,其组成如图 2 所示。

三轴惯性稳定平台的特有优点和作用:有效隔离飞机载体在飞行测量过程中的角运动,使垂向重力传感器(垂向加速度计)在飞行测量中保持垂向,水平重力传感器保持水平,并为重力传感器提供良好的温度、振动和电磁环境,以使重力传感器在实际应用环境下可以达到重力仪要求的测量精度。同时,利用稳定平台的环架系统实现重力仪的高精度现场参数自标定技术,提高重力仪的测量精度和性能。

本次研究主要实现了以下两项实用化技术:

1) 重力仪现场自标定技术

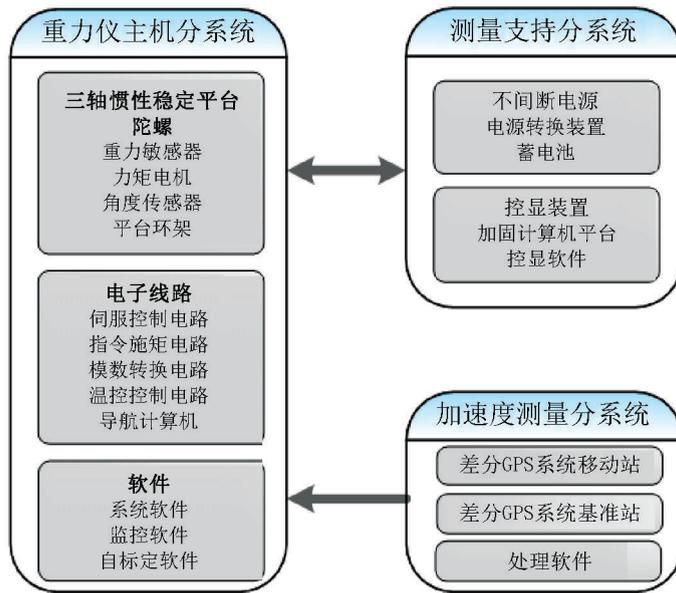


图 2 平台式航空重力仪组成

Fig. 2 Composition block diagram of platform-based airborne gravity

平台式航空重力仪中的陀螺和加速度计的误差参数及其安装误差等在外界环境载荷作用下会随时间发生变化,在其变化到一定程度时将会严重影响重力传感器的姿态保持精度,为此必须定期对这些参数进行标定补偿。

在静基座条件下,三轴惯性稳定平台可利用地球自转角速率和重力两个物理量作为输入,通过使陀螺和加速度计依次旋转到不同位置来实现对这些参数的自标定。但是在机载晃动条件下,地球自转角速率和重力均受到载体晃动的干扰,参数自标定将难于实现。为了实现重力仪现场的自标定,研究中提出了六位置晃动基座开环自标定方法,利用高精度三轴惯性稳定平台在野外现场对航空重力仪进行自标定。

自标定方法采用六位置开环算法。六个位置的具体指向:第一位置(外环:  $-180^\circ$ , 内环:  $-90^\circ$ );第

二位置(外环:  $-90^\circ$ , 内环:  $-90^\circ$ );第三位置(外环:  $-90^\circ$ , 内环:  $-180^\circ$ );第四位置(外环:  $-90^\circ$ , 内环:  $-270^\circ$ );第五位置(外环:  $-90^\circ$ , 内环:  $0^\circ$ );第六位置(外环:  $0^\circ$ , 内环:  $0^\circ$ )。在每个位置上,自标定算法包含 5 个模块:粗对准模块、导航模块、计算中间变量、计算必须的变量和校正算法,其流程如图 3。

通过六位置晃动基座开环自标定方法,对影响重力测量精度较大且随时间变化较快的 18 项陀螺和加速度计参数进行自标定和补偿,解决了机载条件下的晃动干扰问题,实现了高精度三轴惯性稳定平台在野外现场对航空重力仪进行自标定,从而提高稳定平台长时间工作的姿态保持精度。

### 2) 平台姿态误差实时估计和修正技术

为了使重力仪的惯性稳定平台姿态在水平面内稳定精度优于  $10''$ ,需要利用惯性和 GNSS 组合导航对平台动态误差进行实时修正,以保证平台姿态的

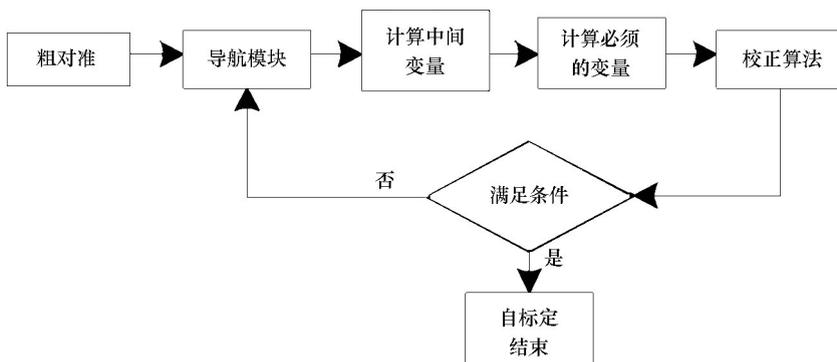


图 3 自标定算法流程

Fig. 3 Flow chart of self calibration algorithm

水平失准角维持在小角度内,提高长时间惯性稳定平台水平姿态保持精度,进而提高航空重力的测量精度。

本次研究采用重力仪提供的速度信息和 GNSS 移动站提供的速度信息通过卡尔曼滤波的方法来实时估计平台失准角,并实时修正水平姿态。

卡尔曼滤波方程为:

$$\begin{cases} \hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \\ P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \\ K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \\ \hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k [Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}] \\ P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1} \end{cases}$$

卡尔曼滤波中状态变量选取为:

$$X = [\delta\varphi, \delta\lambda, \delta V_n, \delta V_u, \delta V_e, \delta\phi_n, \delta\phi_e, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]^T。$$

式中: $\delta\varphi, \delta\lambda$  为纬度、经度误差; $\delta V_n, \delta V_u, \delta V_e$  为北向、天向、东向速度误差; $\delta\phi_n, \delta\phi_e$  为姿态角误差; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$  为载体坐标系上的加速度计零偏; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  为载体坐标系上的陀螺漂移。

卡尔曼滤波解算框图如图 4 所示。在设置好初值后,根据状态方程、量程方程和滤波方程,逐步得到状态变量估计值。

通过惯性和 GNSS 组合导航对平台动态误差进行实时修正,飞行测量过程中惯性稳定平台姿态在水平面内稳定精度优于  $10''$ ,提升了航空重力测量精度。

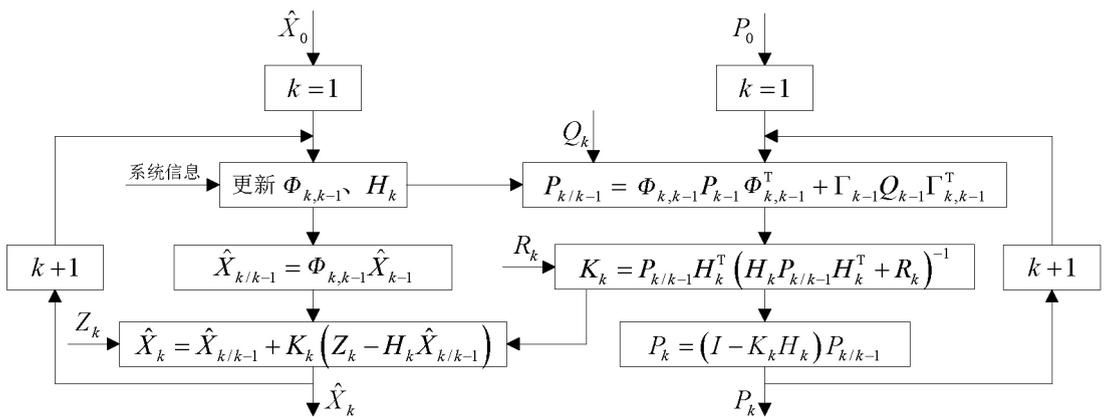


图 4 卡尔曼滤波解算框

Fig. 4 Block diagram of kalman filter

### 3 航空重力数据处理精度进一步提高

结合平台式航空重力仪特点及航空重力野外测量作业要求,在地质探针 GeoProbe 软件平台上开发集成了适用于平台式重力仪的航空重力数据处理软件,其具有数据存储、数据处理、数据管理、图形显示等功能<sup>[8-12]</sup>,软件功能模块如图 5,其数据处理流程如图 6。

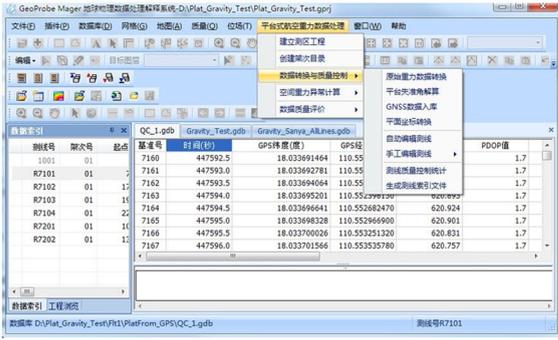
航空重力数据处理软件主要由导航定位解算、航空重力各项改正和数据低通滤波等组成。导航定位解算主要是通过差分导航定位系统获得高精度的载体位置、速度和加速度信息,航空重力各项改正包括载体垂向加速度改正、厄特渥斯改正、正常场改正、高度改正和零漂改正等,再通过数据低通滤波技术提取出微弱重力信息,实现航空重力异常解算。本次研究主要解决了以下两项处理技术:

#### 1) 测量数据精确对准技术

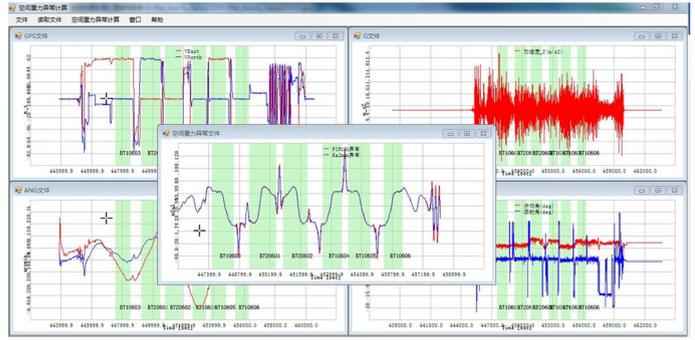
在航空重力测量数据和 GNSS 数据处理过程中,由于航空重力测量数据的采样率(通常数据采样率为 100 Hz 及以上)比 GNSS 数据采样率(通常为 2 Hz)高出很多,需要根据 GNSS 数据中的时间,通过对准找到相对应的航空重力测量数据,不同测量数据之间的精确对准是实现高精度航空重力测量的必经之路。

首先,以 GNSS 数据的整数秒选取对应的航空重力测量数据的测量时间,需保证航空重力测量数据与 GNSS 数据之间的时间偏差控制在  $10^{-3}$  s 之内。其次,为了将高采样率的航空重力测量数据与低采样率的 GNSS 数据(采样率为 2 Hz)进行采样率的匹配,需要对航空重力测量数据进行下采样处理,即对航空重力测量数据进行 FIR 低通滤波,低通滤波之后的数据按照 GNSS 数据采样率进行重采样,形成与 GNSS 数据采样率相一致、时间相对应的航空重力新的测量数据集。

通过以上方法,实现航空重力测量数据与 GNSS



(a) 数据处理软件菜单



(b) 空间重力异常计算软件模块

图5 平台式航空重力测量数据处理软件界面

Fig. 5 Data processing software interface of platform-based airborne gravimetry

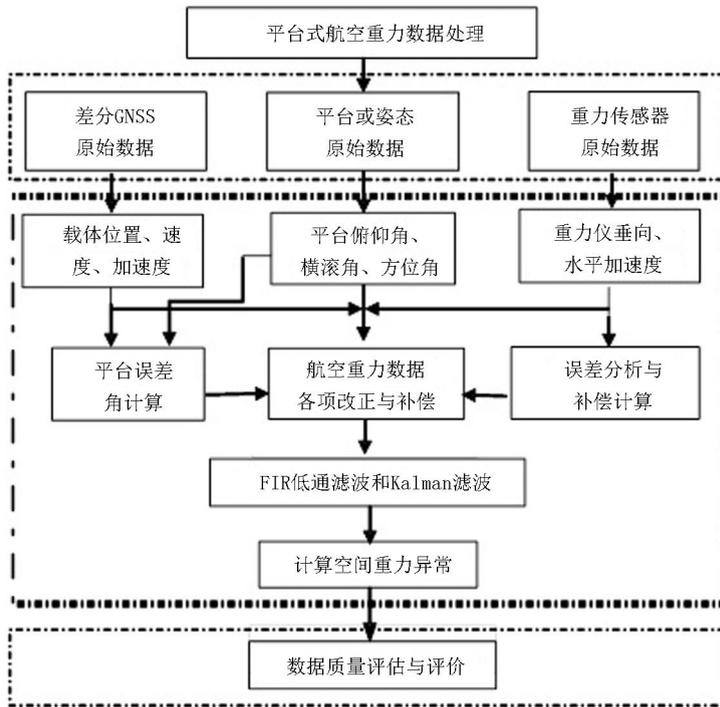


图6 平台式航空重力数据处理流程

Fig. 6 Flow chart of platform-based airborne gravity data processing

数据的时间对准和采样率同步,因而可获得高精度的航空重力异常。

2) 航空重力零相位低通滤波器技术

由于航空重力测量中载体的振动和飞行环境的影响,测量数据中不可避免地会包含大量高频噪声。而重力异常通常只有几十毫伽,因此需通过窗函数FIR等低通滤波器消除高频噪声。但采用FIR低通

滤波器会产生相位延迟,导致滤波后重力异常相对于测量值在时间上发生平移,最终引起重力异常位置偏离真实地理位置。

本次研究在设计低通滤波器时,采用了零相位低通滤波技术(如图7),实现“零相位”的低通滤波。

图中最后输出  $y(n)$  的傅里叶变换为:

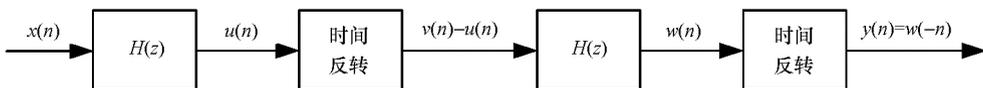


图7 零相位滤波的实现

Fig. 7 Realization of zero phase filter

$$\begin{aligned}
Y(e^{j\omega}) &= W^*(e^{j\omega}) = [V(e^{j\omega})H(e^{j\omega})]^* \\
&= [U^*(e^{j\omega})H(e^{j\omega})]^* = U(e^{j\omega})H^*(e^{j\omega}) \\
&= X(e^{j\omega})H(e^{j\omega})H^*(e^{j\omega}) \\
&= X(e^{j\omega}) |H(e^{j\omega})|^2.
\end{aligned}$$

图 8 是零相位低通滤波前后的数据对比,从图中可以看出:采用零相位低通滤波技术,很好地消除了滤波前后数据的时间延迟。

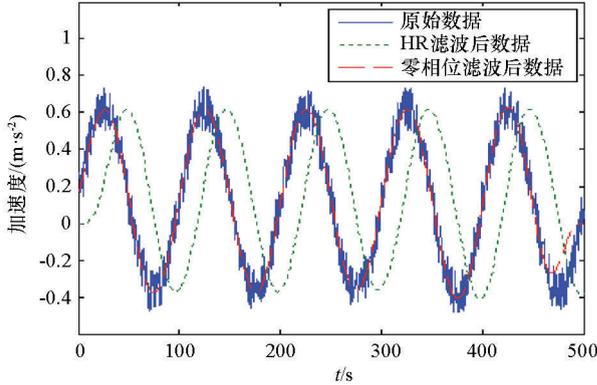


图 8 零相位滤波示例

Fig. 8 Example of zero phase filter

## 4 勘查系统测量结果与分析

2020 年在某地进行了平台式航空重力勘查系统的飞行测试和区域性测量,GT-2A 航空重力勘查系统已经完成了此区域的数据采集。此次飞行测量共完成了 6 个架次的重复线飞行和 7 个架次的测线飞行,所有架次飞行测量高度为 GPS 高度 600 m 平飞,飞行地速约 220 km/h。

### 4.1 测量精度

为了充分测试平台式航空重力勘查系统的测量精度,设计了 EW 向和 SN 向 2 个方向的重复线测试线,通过重复线的内符合精度来评价航空重力勘查系统的测量精度<sup>[13-14]</sup>。6 个架次的重复线飞行共获得 EW 向重复线测线 10 条和 SN 向重复线 9 条。

航空重力测量内符合精度是利用重复线测试数据来评价航空重力重复测量的动态精度,反映的是各重复线测试数据相对于它们的平均场数据的符合程度。

每条重复线重力数据的均方差内符合精度计算公式(1):

$$\sigma_j = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_{ij}^2}{n}}, (i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中: $\delta_{ij}$  为第  $j$  条重复线公共段各点重力值  $F_{ij}$  与该点各重复线重力值的平均值  $F_i$ (式(3))之差; $m$  为重复线数目; $n$  为重复线公共段数据点数。

$$\delta_{ij} = F_{ij} - F_i, \quad (2)$$

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^m F_{ij}}{m}. \quad (3)$$

所有重复线测试数据的内符合精度计算式为:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^n \delta_{ij}^2 \right)}{m \times n}}, \quad (4)$$

将重复线做出水平调整,调整后内符合精度为:

$$\delta_{ij} = (F_{ij} - \bar{F}_j + \bar{F}) - F_i, \quad (5)$$

其中:每条重复线数据的水平平均值为:

$$\bar{F}_j = \frac{\sum_{i=1}^n F_{ij}}{n}, \quad (6)$$

所有重复线的平均场数据的水平平均值为:

$$\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n}. \quad (7)$$

平台式航空重力勘查系统测量的 EW 向重复线(10 条,编号为 R1001~R1010)100 s 低通滤波后的航空空间重力异常内符合精度为  $0.583 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 详见图 9。

SN 向重复线(9 条,编号 R2001~R2009)100 s 低通滤波后的航空空间重力异常内符合精度为  $0.581 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 详见图 10。

GT 航空重力勘查系统同位置的 SN 向测线(6 条,编号 R7001~R7006)航空空间重力异常内符合精度为  $0.613 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 详见图 11。

平台式航空重力勘查系统测量精度优于  $0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (100 s), 动态测量精度高、稳定可靠。与国际先进的 GT-2A 航空重力勘查系统测量结果(同样 100 s 滤波)相比,两者具有很好的一致性,测量精度达到了国际先进水平。

### 4.2 测量总精度

航空空间重力测量总精度评价采用测线与切割线交点残差值的均方差进行评价。7 个架次的飞行测量共获得 50 条测线与 5 条切割线,其交叉点共计 250 个。平台式航空重力勘查系统原始航空空间重力测量总精度  $1.23 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (图 12), 同样统计该区 GT 系统的航空空间重力测量总精度为  $1.03 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (图 13)。

图 14 为平台式航空重力勘查系统原始航空空

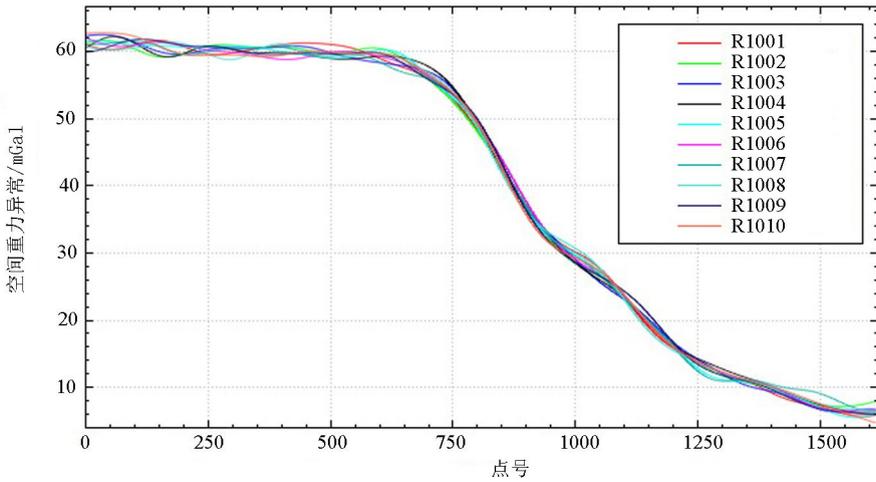


图 9 东西向重复线航空空间重力异常重复测量对比(FIR 低通滤波(100 s))

Fig. 9 Comparison of repeated measurement of airborne space gravity anomaly along East—West repeated line (FIR low pass filter (100 s))

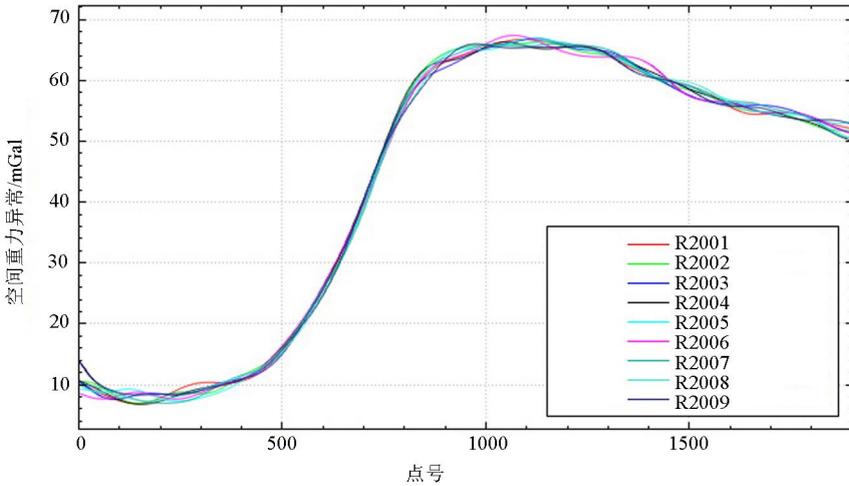


图 10 南北重复线向航空空间重力异常重复测量对比(FIR 低通滤波(100 s))

Fig. 10 Comparison of repeated measurement of airborne space gravity anomaly along North—South repeated line (FIR low pass filter (100 s))

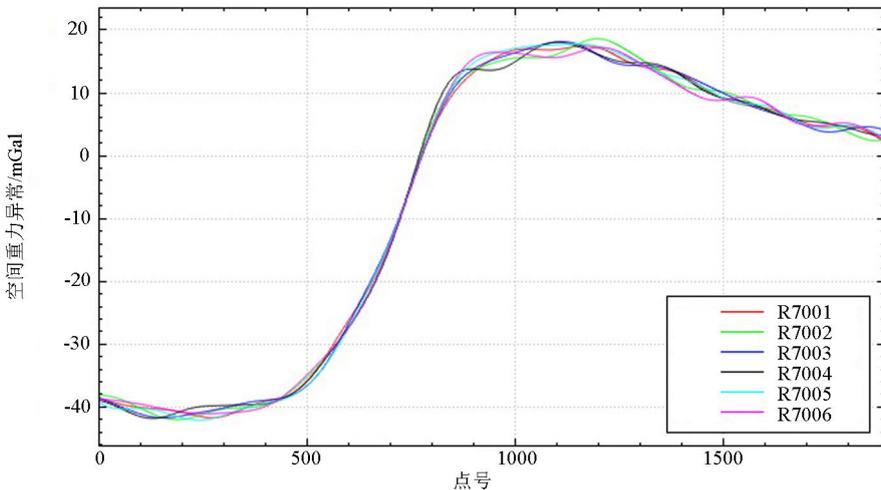


图 11 GT 南北向航空空间重力异常重复测量对比

Fig. 11 Comparison of repeated measurement of GT North—South airborne space gravity anomaly

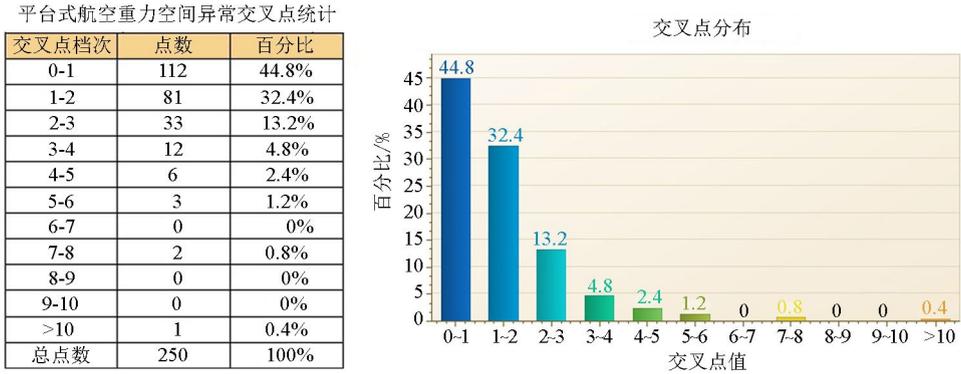


图 12 平台式航空重力勘查系统原始航空空间重力测量交叉点统计

Fig. 12 Intersection statistics of original space gravity anomaly of platform-based airborne gravity exploration system

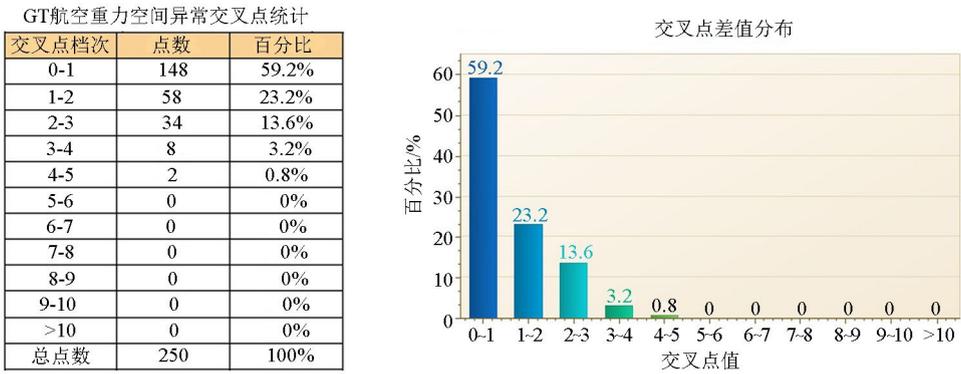


图 13 GT 系统原始航空空间重力测量交叉点统计

Fig. 13 Intersection statistics of original space gravity anomaly of GT gravity exploration system

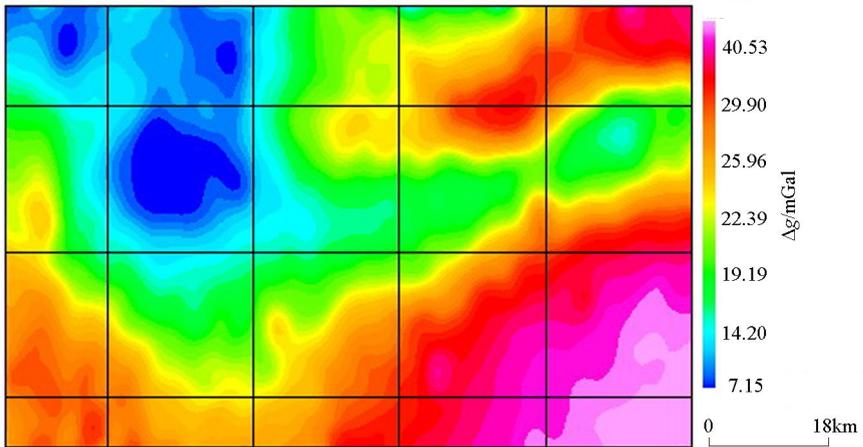


图 14 平台式航空重力勘查系统原始航空空间重力异常

Fig. 14 Original space gravity anomaly map of platform-based airborne gravity exploration system

间重力异常图,图 15 为该区 GT 系统原始航空空间重力异常图。平台式航空重力勘查系统与该区 GT 系统的原始航空空间重力异常分布及走向一致,异常形态非常吻合。

## 5 结论

为了发展高精度、高效率航空重力测量技术,实现快速找矿突破、资源勘探增储等实际应用,研制和集成了平台式航空重力勘查系统。通过测量飞行获得的数据表明:

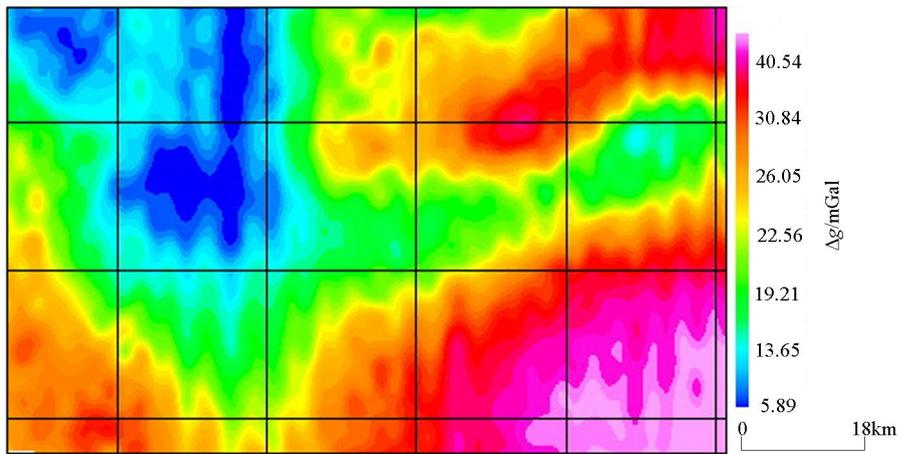


图 15 GT 系统原始航空空间重力异常

Fig. 15 Original space gravity anomaly map of GT exploration system

1) 平台式航空重力勘查系统多架次重复线飞行数据合并统计的内符合精度优于  $0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  (100 s), 说明勘查系统不同时间的重复线测量结果一致性好, 测量结果稳定可靠。

2) 平台式航空重力勘查系统与国际先进的 GT-2A 航空重力勘查系统测量结果相比, 两者具有很好的一致性, 测量精度与引进的设备相当, 勘查系统的测量精度达到了国际先进水平, 并实现了实用化。

**致谢:** 本次平台式航空重力勘查系统的测量和数据处理工作得到了中国自然资源航空物探遥感中心相关技术人员和东南大学蔡体菁教授的大力支持, 在此表示诚挚的谢意。

参考文献 (References) :

[1] 熊盛青, 周锡华, 郭志宏, 等. 航空重力勘探理论与应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2010.  
Xiong S Q, Zhou X H, Guo Z H, et al. Theory, method and application of aerial gravity exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.

[2] 熊盛青. 我国航空重磁勘探技术现状与发展趋势 [J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 113 - 117.  
Xiong S Q. The present situation and development of airborne gravity and magnetic survey techniques in China [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 113 - 117.

[3] 孙中苗. 航空重力测量理论、方法及应用研究 [D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2004.  
Sun Z M. Theory, method and application of aerogravimetry [D]. Zhengzhou: Information Engineering University of the Chinese People's Liberation Army, 2004.

[4] 宁津生, 黄漠涛, 欧阳永忠, 等. 海空重力测量技术进展 [J]. 海洋测绘, 2014, 34(3): 67 - 72.  
Ning J S, Huang M T, Ouyang Y Z, et al. Progress of sea air gravimetry technology [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(3): 67 - 72.

[5] Forsberg R, Olesen A V, Einarsson I. Airborne gravimetry for geoid determination with Lacoste Romberg and Chekan gravimeters [J]. Gyroscopy and Navigation, 2015, 6(4): 265 - 270.

[6] Olson D. GT-1A and GT-2A airborne gravimeters: Improvements in design, operation, and processing from 2003 to 2010 [C]// ASEG Conference Sydney, Australia, 2010.

[7] 胡平华, 赵明, 黄鹤, 等. 航空/海洋重力测量仪器发展综述 [J]. 导航定位与授时, 2017, 7(7): 10 - 18.  
Hu P H, Zhao M, Huang H, et al. Overview of the development of aeronautical/oceanic gravimetric instruments [J]. Navigation, Positioning and Timing, 2017, 7(7): 10 - 18.

[8] 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(5): 872 - 880.  
Luo F, Wang G X, Zhou X H, et al. Research and implementation of data processing method for three-axis stabilized platform airborne gravity measuring system [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 872 - 880.

[9] 罗锋, 郭志宏, 骆遥, 等. 航空重力数据的等波纹 FIR 低通滤波试验 [J]. 物探与化探, 2012, 36(5): 856 - 860.  
Luo F, Guo Z H, Luo Y, et al. Equal-ripple FIR low-pass filtering test for airborne gravity data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(5): 856 - 860.

[10] 蔡劭琨, 吴美平, 张开东. 航空重力测量中 FIR 低通滤波器的比较 [J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 74 - 78.  
Cai S K, Wu M P, Zhang K D. Comparison of FIR low-pass filters in aerogravimetry [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 74 - 78.

[11] 蔡体菁, 周薇, 鞠玲玲. 平台式重力仪测量数据的卡尔曼滤波处理 [J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(6): 718 - 720.  
Cai T J, Zhou W, Ju L L. Processing for measurement data of platform gravimeter by Kalman filter [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(6): 718 - 720.

[12] 王静波, 熊盛青, 郭志宏, 等. 航空重力数据 Kalman 滤波平滑技术应用研究 [J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1717 - 1722.  
Wang J B, Xiong S Q, Guo Z H, et al. Application of Kalman filtering smoothing technique for aeronautical gravity data [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1717 - 1722.

- [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 Z H, Xiong S Q, Zhou J X, et al. Study on the evaluation method of data quality for airborne gravity repeat line test [J]. Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1538-1543.
- [14] 姜作喜,张虹,郭志宏. 航空重力测量内符合精度计算方法[J]. 物探与化探,2010,34(5):672-676.  
Jiang Z X, Zhang H, Guo Z H. Calculating method of internal coincidence accuracy in airborne gravimetry [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(5): 672-676.

## Research on localization of platform-based airborne gravity exploration system

LUO Feng<sup>1,2</sup>, ZHOU Xi-Hua<sup>1,2</sup>, HU Ping-Hua<sup>3</sup>, JIANG Zuo-Xi<sup>1,2</sup>, WANG Guan-Xin<sup>1,2</sup>,  
QU Jin-Hong<sup>1,2</sup>, LI Xing-Su<sup>1,2</sup>, LI Zhao-Liang<sup>1,2</sup>, ZHAO Ming<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 3. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** To meet the accuracy requirements of airborne gravity surveys for deep resource exploration, an airborne gravity survey platform has been developed and integrated based on previous research. The platform system is an airborne gravimeter platform consisting of a three-axis stabilized platform and a quartz flexible pendulum accelerometer. It adopts self-calibration technology and the real-time error estimation and correction technology of platform attitude. Meanwhile, it is equipped with a navigation and positioning system, a vibration reduction system, an unattended system, and data processing software. Flying survey data show that the internal coincidence accuracy of the repeated-line flight data of the airborne gravity survey platform is less than  $0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 (100 \text{ s})$ , reaching the international advanced level. Therefore, this platform allows the technology and equipment of airborne gravity surveys to be localized.

**Key words:** airborne gravimeter platform; airborne gravity survey; FIR (finite impulse response) low pass filter; Kalman filter

(本文编辑:王萌)