

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.04.006

一种采用“捷联+平台”方案的新型航空重力仪

吴美平¹,周锡华²,曹聚亮¹,张开东¹,蔡劭琨¹,于瑞航¹,王明皓¹,铁俊波¹

- (1. 国防科学技术大学机电工程与自动化学院,长沙 410073;
2. 中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘要:针对资源勘探等高精度应用对航空重力仪测量精度和分辨率的更高要求,在前期研究基础之上,研发了新一代采用“捷联+平台”方案的新型航空重力仪。设计了采用石英挠性加速度计和光纤陀螺的捷联式重力仪,采用了新型温度控制方案,提高了重力仪的环境适应能力。设计了稳定平台,将捷联式重力仪保持在垂直方向,隔离载机的角运动干扰,减小了重力传感器的动态误差。飞行试验表明,该方案是有效的,将航空重力仪的精度和分辨率提升到优于 1mGal/3km。

关键词:航空重力测量;捷联式重力仪;稳定平台;飞行实验

中图分类号:P223+.4

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)04-0043-07

The New Airborne Gravimeter Using the “Strapdown+Platform” Scheme

WU Mei-ping¹, ZHOU Xi-hua², CAO Jv-liang¹, ZHANG Kai-dong¹, CAI Shao-kun¹,
YU Rui-hang¹, WANG Ming-hao¹, TIE Jun-bo¹

- (1. College of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the need of application such as resource exploration for better accuracy and resolution airborne gravimeter, a new airborne gravimeter using the “strapdown + platform” scheme is developed on the former research basis. The strapdown gravimeter using quartz flexible accelerometer and fiber optic gyroscope (FOG) is designed, and the environmental adaptability is improved by adopting the new thermal control scheme. The designed stable platform can keep the strapdown gravimeter vertical, insulate the angular motion disturbance, and reduce the dynamic error of the gravity sensor. The result of flight test shows that this scheme is effective and the accuracy and resolution of airborne gravimeter are better than 1mGal/3km.

Key words: Airborne gravimetry; Strapdown gravimeter; Stable platform; Flight test

0 引言

地球重力场的确定对于大地测量学、空间科学、海洋科学、资源勘探及现代军事等学科具有重要意义。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,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^[1]。

收稿日期:2017-04-29;修订日期:2017-06-04

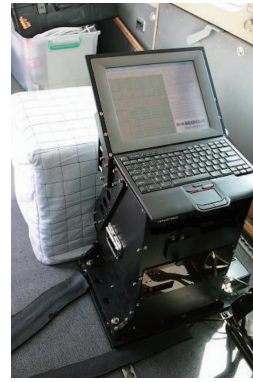
基金项目:国家高技术研究发展计划(2013AA03063902)

作者简介:吴美平(1970-),男,博士,教授,主要从事导航技术方面的研究。E-mail:miepingwu@263.net

对航空重力测量技术的研究可以追溯到 20 世纪 60 年代,但是受限于当时载体加速度的测量精度,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(Global Position System, GPS)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。不同航空重力仪的区别主要体现在两个方面:采用的重力传感器和水平稳定跟踪的方式^[2]。前者采用零长弹簧、金属弹簧、石英挠性加速度计等作为重力传感器。后者采用双轴稳定平台、三轴稳定平台以及捷联式惯导系统来实现水平稳定跟踪。目前国际上商业化的航空重力仪主要为以下几种:基于零长弹簧和双轴稳定平台技术的 LCR 重力仪^[3],其精度和分辨率可以达到 1mGal/6km (1mGal = 10^{-5} m/s²);基于三轴平台惯性导航系统的 AIRGrav 航空重力仪^[4],该重力仪采用石英挠性加速度计作为重力传感器,其精度和分辨率优于 1mGal/(2~4)km;基于三轴稳定平台和专用弹簧型重力传感器的 GT 系列重力仪^[5],其精度和分辨率可以达到 0.6mGal/3km。基于捷联惯性导航系统(Strapdown Inertial Navigation System, SINS)的航空重力仪由于用数学平台代替物理平台,具有体积小、质量小等优点,大量试验表明捷联式重力仪具有同其他类型重力仪相当的测量精度^[6-11]。

国防科学技术大学对捷联式航空重力测量技术的研究始于 2003 年,先后研制了 SGA-WZ01 和 SGA-WZ02 捷联式航空重力仪(如图 1(a)、(b)所示),飞行试验表明,重力仪的精度和分辨率优于 1mGal/4.8km 或 (1~2)mGal/3km^[2,12-14],可以满足大地测量等应用对航空重力测量的需求。但试验也表明,当气象条件良好时,捷联式重力仪的精度较好,当气象条件较差时精度明显下降。这主要是由于捷联式重力仪与载体是直接固连的,重力传感器始终随载机一起运动,使得重力传感器的非正交误差、标度因数误差等误差项在大动态条件下的影响更大,测量精度更容易受载体动态的影响,制约了捷联式重力仪性能的进一步提升。为满足资源勘探等高精度应用对航空重力仪测量精度和分辨率的更高要求,在国家高技术研究发展计划(863 计划)课题的资助下,在 SGA-WZ01 和 SGA-WZ02 的研究基础上,国防科学技术大学和中国国土资源航空物探遥感中心共同研发了新一代采用“捷联+平台”方案的新型航空重力仪,目标是要求精度和分辨率达到 1mGal/3km。本文主要介绍了新型航空重力仪 SGA-WZ03(如图 1(c)所示)的

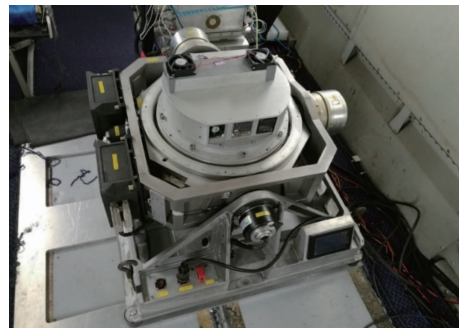
原理以及试验结果。



(a) SGA-WZ01



(b) SGA-WZ02



(c) SGA-WZ03

图 1 SGA-WZ 系列重力仪

Fig. 1 SGA-WZ gravimeters

1 新型航空重力仪的原理

新型航空重力仪 SGA-WZ03 的基本原理是在捷联式重力仪的基础上增加一个稳定平台,稳定平台可以动态跟踪当地水平面,捷联式重力仪安装在稳定平台的内框上,因此通过稳定平台可以隔离载体的角运动,抑制载体角运动对捷联式重力仪测量精度的影响。因此,新型航空重力仪 SGA-WZ03 从本质上依然是捷联式重力仪,其数学模型与早期的捷联式重力仪 SGA-WZ01 和 SGA-WZ02 是一致的,如下所示^[1-2]

$$\delta \mathbf{g}^n = \dot{\mathbf{v}}_e^n + (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \mathbf{v}_e^n - \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b - \boldsymbol{\gamma}^n \quad (1)$$

其中, $\dot{\mathbf{v}}_e^n$ 与 \mathbf{v}_e^n 是载体相对于地球的加速度与速度, \mathbf{f}^b 是由加速度计测量得到的在载体系下的比力, \mathbf{C}_b^n 是载体系到导航系的姿态转换矩阵, $\boldsymbol{\omega}_{ie}^n$ 是地球自转角速度在导航系下的表示, $\boldsymbol{\omega}_{en}^n$ 是导航系相对于地球系的角速度在导航系下的表示, $\boldsymbol{\gamma}^n$ 是导航系下的正常重力值, $\delta \mathbf{g}^n$ 是导航系下的重力扰动向量。

式(1)右边的各个参数可以分成两类:

一类可以由 GNSS 测量得到,包括:载体的运

动速度 v^n , 载体的运动加速度 \dot{v}^n 、通过载体位置计算出的正常重力矢量 $\gamma^n = [0 \ 0 \ \gamma]^T$ 以及通过载体位置和运动速度计算出的 ω_{ib}^n 和 ω_{en}^n 。

另一类由惯导系统获得, 包括载体坐标系下的比力测量值 f^b 以及方向余弦阵 C_b^n 。

由于纯惯导系统测量载体的姿态存在精度随时间发散的问题, 因此需要采用 SINS/GNSS 组合导航的方式实现姿态的精确测量。捷联式重力测量数据处理的流程如图 2 所示。

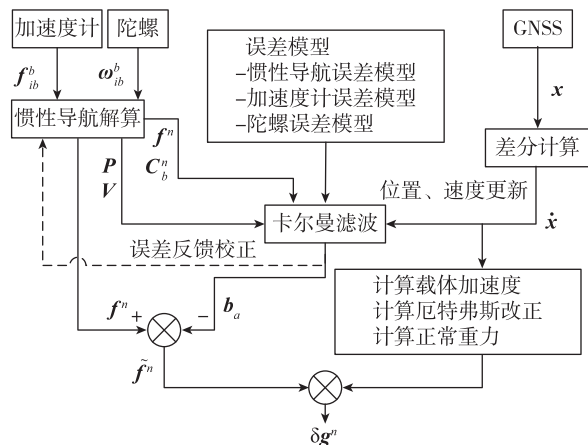


图 2 SGA-WZ03 的数据处理流程图

Fig. 2 The data handle process of SGA-WZ03

具体步骤为:

1) 对加速度计误差 δf^b 、陀螺误差 $\delta \omega_{ib}^b$ 以及导航系下的捷联惯导误差进行建模。根据这些误差模型得到用于卡尔曼滤波的误差模型系统方程。

2) 利用陀螺、加速度计的测量值 f_{ib}^b 和 ω_{ib}^b 在导航系中进行惯导解算, 得到惯导输出的位置、速度、姿态和导航系下的比力测量值。

3) 利用 GNSS 的原始观测信息进行定位, 得到高精度的位置信息。经过一次差分后可得到载体的速度信息。

4) 以 GNSS 得到的载体位置、速度作为观测量对卡尔曼滤波进行更新, 得到惯导系统位置误差、速度误差、姿态误差以及加速度计零偏的估计, 同时利用估计出来的位置误差、速度误差和姿态误差对惯导解算进行反馈校正。并利用估计出来的加速度计零偏对惯导输出的比力测量值 f^n 进行补偿, 得到当地地理坐标系 n 下的比力测量值 \tilde{f}^n 。

5) 对 GNSS 的位置进行两次差分可得到载体的运动加速度。利用 GNSS 的位置、速度信息可计算出哥氏加速度、离心加速度和正常重力值。

6) 对比力测量值 \tilde{f}^n 和 GNSS 载体加速度直接求差计算出重力扰动值 δg^n 。

2 新型航空重力仪的组成

新型航空重力仪 SGA-WZ03 主要由捷联式重力仪、稳定平台、差分 GNSS 系统、减振系统、数据记录系统、数据处理软件等组成, 如图 3 所示。这里重点介绍捷联式重力仪和稳定平台。

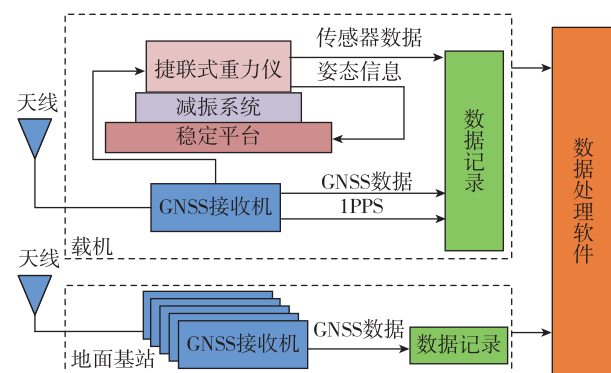


图 3 SGA-WZ03 的系统组成示意图

Fig. 3 The component sketch of SGA-WZ03

2.1 捷联式重力仪

捷联式重力仪集成了重力传感器、姿态测量传感器、温度控制系统、数据采集系统等, 用于实现三维比力和角速度的测量, 其外观如图 4 所示。捷联式重力仪采用高精度石英挠性加速度计作为重力传感器, 模数转换采用电流/频率(I/F)转换电路板。姿态测量传感器采用高精度光纤陀螺, 精度优于 $0.005(^{\circ})/h$ 。

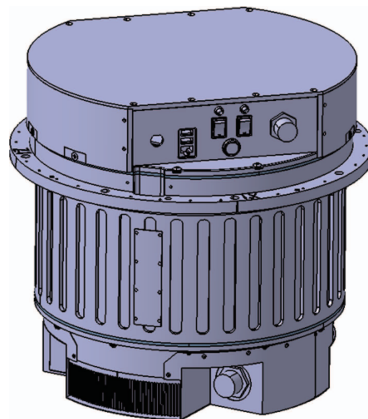


图 4 SGA-WZ03 中捷联式重力仪的外观设计图

Fig. 4 The outlook of the strapdown airborne gravimeter in SGA-WZ03

重力传感器作为重力仪的核心传感器,其分辨率、精度和稳定性是影响系统整体精度的重要因素。由于石英挠性加速度计的测量精度主要受温度的影响,重力仪采用了两级温度控制方案来保证加速度计工作温度的稳定。一级温控的对象为陀螺、加速度计组成的惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU),其目的是为给二级温控提供一个良好的温度环境。第一代捷联式重力仪SGA-WZ01的温度控制采用的是逐级加温方式,即一级温控温度点要高于环境温度,二级温控温度点高于一级温控温度点。这种方案存在两个弊端,一是当环境温度过高或过低时一级温控容易出现失效,并影响二级温控的稳定性;二是光学陀螺最佳工作温度点是常温,长期工作在较高温度下会影响陀螺的寿命。为此,在这一代重力仪中一级温控采用了TEC半导体制冷器温控方案,通过加温或制冷使得一级温控的温度点保持在常温,该方案有效提高了重力仪的环境适应能力。二级温控的对象为3只石英挠性加速度计组成的重力传感器,温控采用加热方式,温度点高于一级温控的温度点^[15]。

图5所示为重力传感器静态测试结果,上图为表头的温度测量值,下图为测得的重力值的漂移曲线,可以看出表头温度稳定性优于 0.02°C ,输出稳定性优于 0.3mGal 。

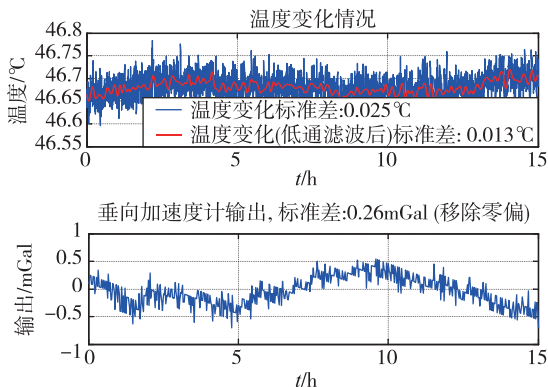


图5 重力传感器的静态测试结果

Fig. 5 The static test result of gravity sensor

2.2 稳定平台

为提高捷联式重力仪的精度和分辨率,设计了稳定平台,利用稳定平台将重力传感器保持在垂直方向,隔离载机的角运动干扰,减小重力传感器的动态误差。为提高重力仪的适应能力,满足不同精度的需求,在设计过程中,充分考虑了捷联式重力仪和稳定

平台的独立性和交互性。一方面,捷联式重力仪可独立于稳定平台单独工作;另一方面,稳定平台也可用于光学相机等其他载荷。为此,稳定平台自带姿态测量传感器,不过为满足重力测量的精度需求,稳定平台的姿态信息需采用捷联式重力仪提供的姿态信息,如图3所示。

稳定平台的结构如图6所示,其中,1是力矩电机;2是捷联重力仪,作为稳定平台的载荷;3是控制箱;4是状态监测信息;5是锁紧装置。

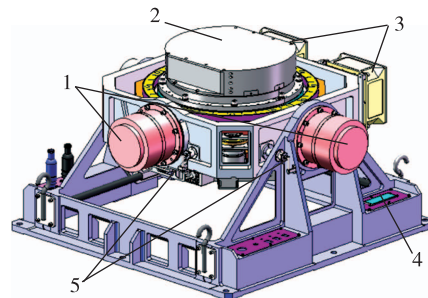


图6 稳定平台的结构图

Fig. 6 The structure of the platform

通过摇摆台试验来测试平台性能。图7给出了摇摆实验中的稳定平台,表1显示了摇摆实验得到的稳定平台性能。摇摆平台测试表明稳定平台的性能满足设计指标,可以完成其稳定跟踪功能。

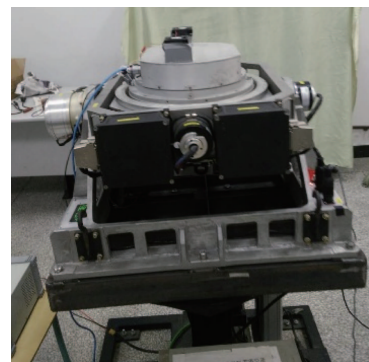


图7 摇摆实验中的稳定平台

Fig. 7 The swaying platform test of stable platform

表1 稳定平台的性能指标

Tab. 1 The properties of stable platform

	设计指标/(°)	测试结果/(°)
横滚轴稳定范围	± 30	—
俯仰轴稳定范围	± 30	—
横滚轴稳定精度	0.2	$-0.20 \sim +0.17$
俯仰轴稳定精度	0.2	$-0.09 \sim +0.15$

3 飞行实验与结果

2016 年底,在广西北海对新型航空重力仪 SGA-WZ03 进行了飞行试验,本次试验采用固定翼型飞机 Cessna208b(如图 8 所示),飞机配备有自动驾驶仪,测线平均飞行海拔为 600m,平均飞行速度为 60m/s。重力仪原始数据采样频率为 200Hz,GNSS 数据采样频率为 2Hz。为更好地评价试验结果,飞机上同时安装有从俄罗斯进口的 GT-2A 型航空重力仪,图 9 所示为飞机机舱内部重力仪的安装情况。



图 8 Cessna208b 飞机
Fig. 8 The aircraft Cessna208b



图 9 Cessna208 机舱内部
Fig. 9 The cabin of Cessna208b

本次飞行试验总共进行了 4 个架次的飞行,其中 2 个架次为重复线飞行,共获得 16 条重复线。其余 2 个架次为测区网格飞行,获得 8 条南北向测线和 4 条东西向切割线,共有 32 个交叉点。飞行试验

过程中重力仪连续工作约 20 天,捷联式重力仪和稳定平台均正常工作,表现出良好的稳定性。

3.1 重复线测量结果

重复测线为东西向测线,长度约为 45km。第 1 架次重复测线(T01)共有 6 条重复线,其中一条测线由于进入测线时未完全对准,飞机造成较大扰动,在测线的北端质量较差,因此只统计了其余 5 条测线的精度,如图 10 所示,可以看出异常半波长分辨率为 3km 时,重复线内符合精度为 0.941mGal。

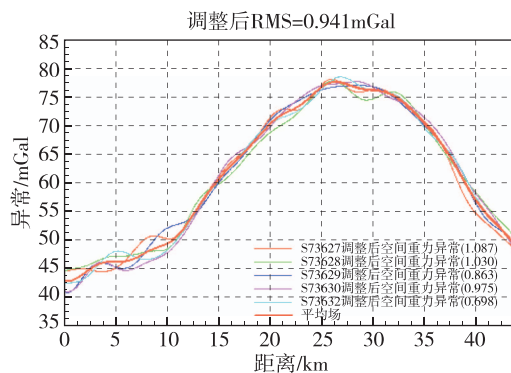


图 10 第一架次重复测线结果
Fig. 10 Result of the first repeated line

第 2 架次重复测线(T02)共有 10 条重复线,重力异常结果如图 11 所示,可以看出异常半波长分辨率为 3km 时,内符合精度为 0.849mGal。

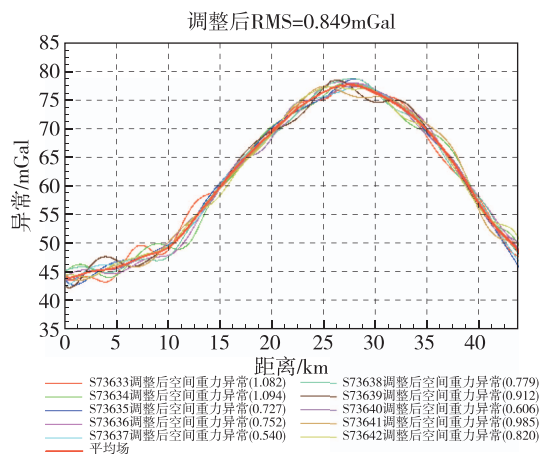


图 11 第二架次重复测线结果
Fig. 11 Result of the second repeated line

通过与 GT-2A 航空重力仪所测得的结果进行比对可以考察 2 套重力仪的一致性。图 12 所示为 T01、T02 飞行架次 GT-2A 15 条重复线平均航空空间重力异常与 SGA-WZ03 15 条重复线航空空间重

力异常的对比图,计算 SGA-WZ03 15 条重复线航空空间重力异常与 GT-2A 平均航空空间重力异常的外符合精度值为 0.955mGal,异常半波长分辨率均为 3km。

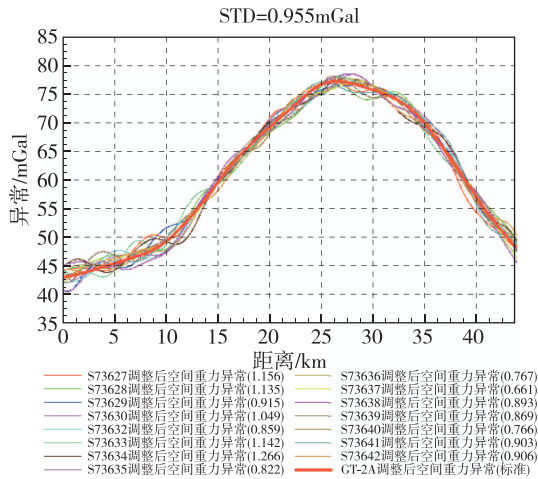


图 12 与 GT-2A 平均场重力异常对比图
Fig. 12 Comparison to average of GT-2A

3.2 网格线测量结果

图 13 所示为 GT-2A 航空重力测量经调平后得到的最终空间重力异常图,图 14 所示为 SGA-WZ03 航空重力测量经调平后得到的最终空间重力异常图。两图异常走向和异常幅度一致,异常反映清晰,吻合得很好。

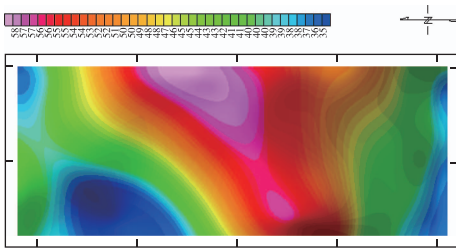


图 13 GT-2A 最终重力异常图
Fig. 13 Gravity anomaly map of GT-2A

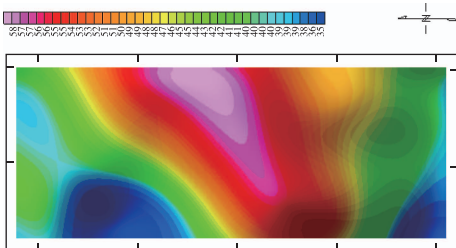


图 14 SGA-WZ03 最终重力异常图
Fig. 14 Gravity anomaly map of SGA-WZ03

为客观评价 2 套测量系统的差异,将 2 套系统数据对应做差值,得到航空空间重力异常差值图如图 15 所示。统计结果最大值为 3.926mGal,最小值为 -2.905mGal,标准差为 0.859mGal。

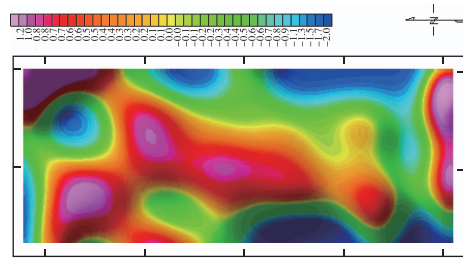


图 15 GT-2A 与 SGA-WZ03 之间重力异常差值图
Fig. 15 Difference between two gravity anomaly maps of GT-2A and SGA-WZ03

4 结论

针对资源勘探等高精度应用对航空重力仪测量精度和分辨率的更高要求,研制了采用“捷联+平台”方案的新型高精度航空重力仪。飞行试验表明:

- 1) 2 个架次重复测线内符合精度和分辨率分别为 0.941mGal/3km 和 0.849mGal/3km, 优于 1mGal/3km 的指标要求。
- 2) 2 个架次重复测线与 GT-2A 的符合度为 0.955mGal/3km, 网格测线获得重力异常图与 GT-2A 的符合度为 0.859mGal, 说明新型航空重力仪 SGA-WZ03 的精度与 GT-2A 接近。
- 3) 新型高精度航空重力仪 SGA-WZ03 的精度和分辨率有了较大提升, 证明了采用“捷联+平台”方案的有效性。

参考文献

[1] 张开东. 基于 SINS/DGPS 的航空重力测量方法研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.

[2] 蔡劭琨. 航空重力矢量测量及误差分离方法研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.

[3] 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.

[4] Studinger M, Bell R, Frearson N. Comparison of AIRGrav and GT-1A airborne gravimeters for research applications [J]. Geophysics, 2008, 73(6): 151-161.

- [5] Olson D. GT-1A and GT-2A airborne gravimeters: Improvements in design, operation, and processing from 2003 to 2010 [C]//ASEG(Australian Society of Exploration Geophysicists) Conference, Sydney, Australia, 2010.
- [6] Bruton A M. Improving the accuracy and resolution of SINS/DGPS airborne gravimetry [D]. Calgary: Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, 2000.
- [7] Becker D, Nielsen J E, Ayres-Sampaio D, et al. Drift reduction in strapdown airborne gravimetry using a simple thermal correction [J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(11): 1133-1144.
- [8] Li X. Strapdown INS/DGPS airborne gravimetry tests in the Gulf of Mexico [J]. Journal of Geodesy, 2011, 85(9):597-605.
- [9] Wang W, Luo O, Xue Z, et al. Progress in the development of laser strapdown airborne gravimeter in China [J]. Gyroscopy and Navigation, 2015, 6(4): 271-277.
- [10] Chiang K W, Lin C A, Kuo C Y. A feasibility analysis of land-based SINS/GNSS gravimetry for groundwater resource detection in Taiwan [J]. Sensors, 2015, 15(10):25039.
- [11] Ayres-Sampaio D, Deurloo R, Bos M, et al. A comparison between three IMUs for strapdown airborne gravimetry [J]. Surveys in Geophysics, 2015, 36(4): 571-586.
- [12] Cai S, Wu M, Zhang K, et al. The first airborne scalar gravimetry system based on SINS/DGPS in China [J]. Science China Earth Science, 2013, 56(12):2198-2208.
- [13] Zhao L. A flight test of the strapdown airborne gravimeter SGA-WZ in greenland [J]. Sensors, 2015, 15(6):13258-13269.
- [14] Zhao L, Wu M, Forsberg R, et al. Airborne gravity data denoising based on empirical mode decomposition: a case study for SGA-WZ greenland test data [J]. International Journal of Geo-Information, 2015, 4(4):2205-2218.
- [15] Cao J, Wang M, Cai S, et al. Optimized design of the SGA-WZ strapdown airborne gravimeter temperature control system [J]. Sensors, 2015, 15(12): 29984-29996.