

doi: 10.11720/wtyht.2019.0085

张虹,周能,邓肖丹,等.国外航空重力测量与数据处理技术最新进展[J].物探与化探,2019,43(5):1015-1022.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0085

Zhang H, Zhou N, Deng X D, et al. The latest progress in air gravity measurement and data processing technology abroad[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 1015-1022. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0085

国外航空重力测量与数据处理技术最新进展

张虹¹, 周能², 邓肖丹³, 王萌³, 李行素³

(1. 北京信息科技大学 信息管理学院, 北京 100192; 2. 北京越音速科技有限公司, 北京 100192;
3. 自然资源部 航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083)

摘要: 航空重力作为一种新兴的地球物理勘查技术已经得到迅速发展, 掌握国外最新技术对于我国开展此项测量和研究, 赶超国外先进水平具有重要意义和实用价值。文中首次全面研究总结了国外最新的航空重力测量与数据处理技术, 系统地介绍了国外最先进的系统集成、测量方法和数据处理等技术, 分别开展了分析对比, 并对未来发展趋势进行了展望。由此读者可全面地了解国外最先进的航空重力测量技术, 并可在测量和研究中直接深度引用这些技术, 促进和推动我国航空重力测量技术水平的发展。

关键词: 航空重力; 测量方法; 数据处理技术

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2019)05-1015-08



0 引言

航空重力测量技术作为一种新兴的勘查技术, 在近 10 年内得到迅速发展, 尤其是西方发达国家^[1]。国外航空重力测量主要使用加拿大 SGL 公司(sander geophysics limited)的 AIRGrav、俄罗斯 GT (gravimeter technologies ltd)公司的 GT-1A/2A 航空重力测量系统, 利用中小型的固定翼飞机、直升机等集成了航空重力、航空重(磁)和航空重(磁、放)等多种形式的勘查系统, 测量参数也由单一的重力测量发展为重(磁)、重(磁、放)等综合测量, 测量效率明显提高。每年航空重力勘查任务大约 30~40 万测线公里, 主要用于基础地质研究、石油天然气调查、大地水准面测量、区域地球物理勘探、矿产资源勘查和军事基础建设等工作, 应用前景广泛, 成果十分显著, 对地球重力场研究做出了重大的贡献。

国外开展航空重力测量先于我国, 大规模高精度航空重力测量始于 21 世纪初^[1-2]。经过近 20 年的快速发展, 已经形成了成熟的航空重力勘查系统

集成技术及基于地球物理测量的通用航空重力测量方法和数据处理技术, 推动了航空重力测量技术的进步和事业的发展。笔者系统总结和研究了国外航空重力勘查系统集成、测量方法和数据处理等 3 个方面的方法技术, 向读者详细介绍了该领域国外发展的最新技术, 供借鉴和进一步研究, 以此来促进我国航空重力测量技术的快速发展, 赶超国外先进水平, 为地球系统科学研究提供高精度的基础数据。

1 航空重力勘查系统发展现状

目前, 航空重力勘查系统主要由航空重力仪、差分 GPS 系统、飞行平台和数据处理软件等组成。国外主要航空重力仪有 3 种类型: GT-1A/2A 航空重力仪、AIRGrav 航空重力仪和 TAGS 航空重力仪^[3]。飞行平台多种多样, 主要为中—小型固定翼飞机和直升机。国外航空重力勘查系统已发展成多类型的固定翼航空重力勘查系统和日趋成熟的直升机航空重力勘查系统, 正致力于发展小型化的航空重力勘查系统。

收稿日期: 2019-02-19; 修回日期: 2019-04-09

基金项目: 国家重点研发计划项目“航空重力测量技术装备研制”课题“航空重力数据处理软件实用化研制”(2017YFC0601705)

作者简介: 张虹(1963-), 女, 副教授, 现主要从事地球物理测量方法技术、数理统计应用技术等领域的研究工作。Email: Zhanghong921228@sohu.com

1.1 集成出多类型的固定翼航空重力勘查系统

加拿大 SGL 公司利用 AIRGrav 航空重力测量系统,使用 Cessna208、DA42 和 DHC-6 等多种固定翼飞机作为航空重力的飞行平台,除了集成单一的航空重力勘查系统外(如图 1),还集成了重/磁综合勘查系统、航重和航磁水平梯度综合勘查系统^[4-5]。这些系统可以获得高分辨率的航空重力测量数据,环境适应能力强,测量效率高。



图 1 安装 AIRGrav 重力仪的 DA-42 飞机
Fig.1 DA-42 aircraft installed with AIRGrav gravimeter

CMG 公司(canadian micro gravity)利用 GT1A/2A 航空重力测量系统,使用 Cessna208、BN-2T、DA42 等多种固定翼飞机飞行平台,集成了航空重力勘查系统、航空重(磁)和航空重(磁、放)综合勘查系统^[6-7]。图 2 为 CMG 公司在 BN-2T 飞机上集成的 GT-2A 航空/磁/放综合勘查系统,实现了一次飞行同时获取多种地球物理参数的目标,大大地提高了勘查效率。



图 2 安装航空重(磁、放)的 BN-2T 飞机
Fig.2 BN-2T aircraft installed with airborne gravity, magnetic, radiation

俄罗斯的 Aerogeophysica 公司利用 AN-26、AN-30 等飞机集成了 GT-1A/2A 航空重力勘查系统,在本土和北极部分地区完成了 1:10 万和 1:20 万比例尺的航空重力测量。美国 DGS 公司(dynamic gravity system)利用 C-130“大力神”飞机集成了 AT1A 航空重力勘查系统,在南极开展了航空重力测量。

到目前为止,国外成功用于航空重力测量的固定翼飞机多达 22 种,主要为中—小型固定翼飞机,主要机型有:CESSNA208、DHC6、AK350、BN-2T、PA31、AN24、AN26 等。

1.2 研制出成熟的直升机航空重力勘查系统

SGL 公司利用 AIRGrav 航空重力仪在 AS350-B3 直升机上集成了航空重力勘查系统、航空重/磁和航空重/磁/放综合勘查系统,并在加拿大 Quesnellia 地区开展了航空重/磁/放综合测量。同样,CMG 公司和加拿大 Geotech 公司也在 AS350-B3 直升机上集成了 GT-2A 直升机航空重力勘查系统(图 3)。俄罗斯地球物理所使用米-8 直升机(MI8),集成了 GT-1A 直升机航空重力勘查系统,并



图 3 GT-2A 直升机航空重力勘查系统
Fig.3 GT-2A helicopter airborne gravity survey system

在俄罗斯 Aral Sea 的地区开展了飞行测量^[8]。到目前为止,国外成功用于航空重力测量的直升机达到 6 种,主要机型有:AS350 B2/B3、R44、LAMA、S76、ALH 和 MI8 等。

1.3 发展小型化的航空重力勘查系统

国外集成的航空重力勘查系统已呈多样化,不仅成功地实现了多平台的航空重力勘查系统,而且实现了多参数多种组合的航空重力勘查系统,以满足不同目的的地球物理勘查任务。目前世界各国正致力于发展小型化、更高精度的航空重力勘查系统,以期用于更为经济的飞行平台,获取更多参数的高分辨率航空重力综合勘查系统,实现更为广泛的应用。

2 航空重力测量方法发展现状

由于航空重力测量系统抗颠簸能力的增强,航空重力可在各种不同的测量条件下开展调查工作,比如海岸带,或是起伏地形的等高度飞行测量,或是高山区的缓起伏飞行测量,在起伏飞行和中—强颠簸条件下进行测量均能正常工作。缓起伏飞行方法的发展,有效地突出了地质效果,且能满足了航空地球物理综合测量等要求;同时随着航空重力测量精度的提高,大比例尺航空重力测量也应运而生,拓宽了航空重力的应用领域,可实现更为精细的航空重

力测量工作。

2.1 推广了航空重力起伏飞行测量方法

在传统固定翼航空重力平飞测量的基础上,发展了固定翼和直升机航空重力缓起伏飞行的测量方法,并逐步发展为成熟的技术。2007 年 SGL 公司率先利用 AIRGrav 航空重力仪在 BN-2B Islander 飞机和 AS350-B3 直升机上集成了航空重/磁综合勘查系统,并在加拿大 British Columbia 的 Quesnellia 地区开展 1:20 万比例尺航空重/磁综合测量,局部加密到 1:10 万比例尺,平均地速大约 185 km/h,完成的总工作量约为 27 000 km。2009 年 SGL 公司在 British Columbia 的 QUEST 南部地区开展了高分辨率的航空重力调查,测线距为 2 km,控制线线距为 20 km,使用飞机 CESSNA 场 208B (C-GSGJ) 和钻石之星 DA-42 (C-GSDK),平均地速大约 166.5 km/h,完成的总工作量约为 25 010 km。以上两个测区均为丘陵区和陡峭山区,地形海拔高度分别为 380~2 500 m 和 62~2 587 m。SGL 公司事先按照起伏坡度 76 m/1 600 m 爬升和下降率根据地形设计出起伏飞行的测线,沿着设计的测线采用起伏飞行的方法,飞行高度为 200 m (真高),并且实际飞行高度与设计飞行高度偏差>15 m 的连续长度要求<7 km。采用起伏飞行的方法,既尽可能地接近探测目标体获得更好的测量效果,又有利于获得高质量的航空重力测量数据。

作为 2007 年春的死海综合调查项目 (DE-SIRE),沿着和垂直于死海盆地的 Aquaba 和死海之间的断裂进行了直升机航空重力测量。测量飞机为德国 Sikorsky S-76B 型直升机,CMG 公司提供 GT-1A 航空重力仪。死海谷位于海平面下方 400 多 m,山脊高度高于 1 500 m。考虑到死海盆地地形高差大,采用低速和沿地形起伏飞行的直升机航空重力测量,获得了尽可能好的测量质量和高的分辨率。

2.2 发展了大比例尺航空重力测量方法

为了解决航空重力用于矿产资源勘查等异常空间分辨率能力不足的问题,发展了大比例尺航空重力测量方法。至今为止不完全统计,SGL 公司分别在 6 个小测区开展了大比例尺直升机 AIRGrav 航空重力调查,用于矿产资源勘查。采用低速 (56 km/h,或 16 m/s) 50 m 线距进行测量,同时采用机载激光扫描系统 (LiDAR) 获取高分辨率 (网距 1 m) 的数字地形模型,通过增强数据处理技术,获得了测量精度为 $0.4\times10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、异常空间分辨率 300 m 高精度航空重力数据,满足了矿产资源勘查的需要。图 4 展示了 Podolsky 测区叠加在地形模型上的重力异常

图,该区为铜、镍混合硫化物矿,目的是通过航空重力反演计算为该区提供更可信的大高密度体分布情况。在航空重力异常反演时,利用航磁和钻井资料进行反演约束^[9]。

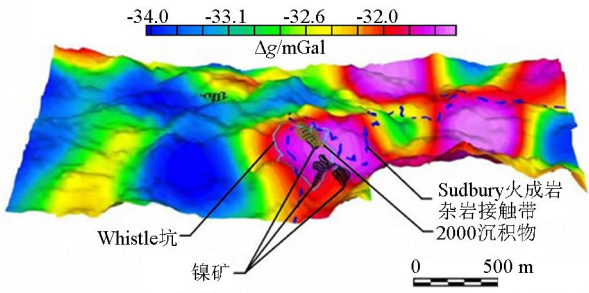


图 4 Podolsky 区直升机航空布格重力异常
Fig.4 Airborne bouguer gravity anomaly of helicopter in Podolsky area

在俄罗斯 Aral Sea 南西的 Uzbekistan 地区开展了大比例尺 GT-1A 直升机 (MI8) 航空重力测量^[8],测区面积 3 000 km²。该区为平底夹带数十米高陡坡的地形,平底部被盐水沉积层覆盖,难以进行地面重力测量。测量时采用 300 m (海拔高度) 同一高度飞行,以减少起伏飞行加速度的影响,距地表 80~230 m。测量线距为 250 m、切割线线距为 2 500 m,较密的测线可提供了更多的测量数据,为的是在数据处理过程中减少扰动加速度的影响。采用滤波长度为 80~100 s 的 Kalman 滤波,在速度 160 km/h 时的异常空间分辨率为 1.5~2.0 km。采用由几条测线网格数据形成的数字重力场模型来评价测量误差,模型的均方差 (RMS) 为 $0.36\times10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。而后利用航空重力资料,加上钻井和地震资料,圈定出碳氢化合物勘探远景区。

2.3 形成了航空重力测量技术要求

国外各公司 (不同机构) 均根据自身的仪器特点,制定了航空重力的测量方法、校正方法、质量控制和数据处理等内部技术要求^[10],其中质量控制和数据处理在业内有比较统一方法和标准。虽然各公司之间并没有形成统一的测量技术要求或测量技术规范,但这些技术要求仍然是制订商业合同的依据,或成为本国航空重力测量的技术标准。

AIRGrav 和 GT-1/2A 航空重力测量工作量占据目前世界上的 80% 以上,为最先进、主流的航空重力测量系统。表 1 中的技术指标分别代表着 2 套测量系统目前的技术水平。

2.4 致力于开发高分辨率航空重力测量技术

沿地形低高度的缓起伏飞行和大比例尺航空重力测量技术,已成为成熟的技术而得到广泛应用,

表 1 国外航空重力测量各技术参数汇总

Table 1 Summary of technical parameters of airborne gravity survey abroad

参 数		SGL 公司(AIRGrav)	CMG 公司(GT-1/2A)
测量精度 (测线与控制线交叉 点残差的均方差)	所有测线	$\leq 0.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (RMS) (0 阶水平调整后)	$\leq 0.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (RMS) (1 阶水平调整后)
	单架次	$\leq 1.25 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (RMS) (0 阶水平调整后)	$\leq 1.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (RMS) (1 阶水平调整后)
内符合精度	所有重复线计算	$\leq 0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (RMS)	$\leq 0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (RMS)
零 漂	整架次	$\leq 2.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$	$\leq 2.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$
定位误差	X、Y、Z 精度(差分后)	$\leq \pm 5 \text{ m}$	$\leq \pm 10 \text{ cm}$
测线偏航距	测线偏航超过 100 m	连续长度 < 4 km	连续长度 < 5 km
飞行高度	与设计高度	与设计高度偏差 > 15 m 的连续 长度 < 7 km	(设计高度 $\pm 10 \text{ m}$) 之内占 80% 以上(平飞)
	离地垂直高度	采用沿起伏飞行,飞行高度 一般为 200 m(真高)	300 m ~ 600 m(平飞),离最高障碍 物不小于 200 m。
测量比例尺	基础地质及油气调查等	1:5 万 ~ 1:20 万	1:5 万 ~ 1:20 万
	矿产资源等	1:5 000 ~ 1:2.5 万	1:1 万 ~ 1:5 万
控制线		控制线垂直于测线,其线距一般为 测线线距的 10 倍	控制线垂直于测线,其线距一般为 测线线距的 10 倍。
GPS 卫星数		共用星数 ≥ 4 颗	星数 ≥ 6 颗
飞行速度		固定翼: 160 ~ 220 km/h	固定翼: 160 ~ 220 km/h
		直升机: 50 ~ 160 km/h	直升机: 50 ~ 160 km/h

获得了比较满意的测量效果。但目前航空重力异常空间分辨率相对有限,仍然不能完全满足矿产资源勘查等需求,发展更高空间分辨率的航空重力测量技术成为今后世界各国努力的方向。

发展高空间分辨率的航空重力测量技术,除了在测量高度降低和测量比例尺加大等测量技术做出努力外,更需要发展新型航空重力测量技术装备,比如:航空重力梯度测量系统,甚至是航空重力全张量梯度测量系统,有效地提高航空重力异常的空间分辨能力,才能充分发挥航空重力在地球探测中的应用能力。

3 航空重力数据处理技术发展现状

航空重力数据处理主要包括:惯导与 DGPS 数据解算,数据质量统计控制,测线自由空间重力异常计算(各项改正和滤波计算),数据调平处理,数据噪声处理,地形改正处理,基础图件编制,数据质量评价。航空重力测量系统研制厂商针对各自的航空重力仪开发出航空重力数据处理软件,可以说都是唯一的^[4,6,11]。航空重力数据处理中的厄特渥斯等各项改正所采用方法基本一致,但在获得航空重力自由空间重力异常所采用滤波方法和相关改正顺序上大相径庭。

3.1 差分 GPS 及与惯导系统组合解算是高精度定位的关键

勘查飞行时,飞行载体引起的扰动加速度可达

到 1 m/s^2 ,航空重力数据处理必须从上万毫伽强动态干扰的环境中计算出重力值,为了实现航空重力测量,采用双频差分 GPS 方式获取高精度的载体数据^[12]。SGL 公司研究表明:高精度的差分 GPS 处理技术是获取高分辨率 and 高质量重力数据的关键。

通常采用差分 GPS 的载波相位观测数据来解算载体的位置、速度和加速度,并利用双频(L1、L2)、单频(L1)对载波相位解算结果进行相互检查。在确定速度和加速度时也常常用到差分多普勒数据,多普勒方法是满足载波相位解算的初始逼近。

航空重力通常采用 GPS/惯性组合的方式进行解算,取长补短,使组合后两者的精度高于两个系统单独工作的精度。一方面通过惯导系统的定位数据来修复 GPS 的跳点和错误点,对 GPS 数据的完整性进行检测,提高 GPS 数据质量;另一方面利用 GPS 数据对惯性系统中的惯性传感器漂移等参数进行修正,减小稳定平台姿态角的误差,以提高航空重力水平加速度改正的精度。

3.2 航空重力各项改正基本上采用通用的技术

航空重力各项改正按式(1)计算

$$\Delta g = g_b + (g_z - g_z^0) - \dot{v}_U + \delta a_E + \delta a_H + \delta a_F + \delta a_K - g_0,$$

(1)

其中: Δg 为航空自由空间重力异常值, 10^{-5} m/s^2 ; g_b 为停机坪处重力传感器上的绝对重力值,从国家重力基点联测得到, 10^{-5} m/s^2 ; g_z 为航空重力观测值, 10^{-5} m/s^2 ; g_z^0 为基点前观测值的平均值, 10^{-5} m/s^2 ; \dot{v}_U 为载体垂向加速度值, 10^{-5} m/s^2 ; δa_E 为厄特

渥斯改正值, 10^{-5} m/s^2 ; δa_H 为水平加速度改正值, 改正水平加速度在垂直方向产生的影响, 10^{-5} m/s^2 ; δa_F 为高度改正值, 10^{-5} m/s^2 ; δa_K 为零点漂移改正值, 10^{-5} m/s^2 ; g_0 为观测点垂直影射到参考椭球面上对应点的正常重力值, 可采用国际大地测量协会 (IAG) 1980 年国际正常重力公式等模型计算得到, 10^{-5} m/s^2 。

1) 厄特渥斯改正

厄特渥斯改正 δa_E (10^{-5} m/s^2) 的严密数学表达式为:

$$\delta a_E = 2\omega \cos\varphi \cdot v_E + \frac{v_E^2}{N+h} + \frac{v_N^2}{M+h} \quad (2)$$

其中: ω 为地球自转角速度, rad; φ 为观测点的地理纬度, rad; v_E 、 v_N 为飞机东向和北向速度, m/s; N 、 M 为卯酉圈和子午圈的曲率半径, m; h 为观测点基于参考椭球面的高度, m。

2) 水平加速度改正

假设稳定平台(或姿态角度)发生偏离, 其偏离角为 θ 。通常情况下, 稳定平台(或姿态)偏离角 θ 很小, 于是水平加速度改正值 δa_H (m/s^2) 可简化为:

$$\delta a_H = \frac{g}{2}\theta^2 + a_H\theta, \quad (3)$$

其中: g 为当地重力值, m/s^2 ; a_H 为水平加速度, m/s^2 。

3) 正常重力场改正

一般采用国际大地测量协会 (IAG) 1980 年大地测量参考系统中的正常重力场进行改正, 其改正值 g_0 (m/s^2) 的计算公式为:

$$g_0 = 9.780327(1 + 5.3204 \times 10^{-3} \sin^2\varphi - 5.9 \times 10^{-6} \sin^2 2\varphi), \quad (4)$$

其中: φ 为观测点地理纬度, rad。

4) 高度改正

航空重力空间(高度)改正 δa_F (10^{-5} m/s^2) 的计算公式通常采用^[14]:

$$\delta a_F = 0.3086 \cdot (1 + 0.0007 \cos 2\varphi)(h - \Delta h) - 0.72 \times 10^{-7} \cdot (h - \Delta h)^2, \quad (5)$$

其中: φ 为观测点地理纬度, rad; h 为观测点基于参考椭球面的高度, m; Δh 为大地高的偏心改正值, m。

5) 零漂改正

零漂改正分为 2 种情况^[13]: 前校与后校为同一基点时, 零漂改正值 δa_K (10^{-5} m/s^2) 计算公式(6)为:

$$\delta a_K = -(g_Z^1 - g_Z^0) \cdot \frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \quad (6)$$

前校与后校不是同一基点时, 零漂改正值 δa_K (10^{-5} m/s^2) 计算公式(7)为:

$$\delta a_K = -(g_Z^1 - g_Z^0) - (g_b^1 - g_b^0) \cdot \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}, \quad (7)$$

其中: g_Z^0 、 g_Z^1 为前校、后校重力观测值的平均值, 10^{-5} m/s^2 ; t_0 、 t_1 、 t 分别为前校、后校和飞行测量对应的观测时间, s; g_b^0 、 g_b^1 分别为前校、后校基点处的重力场值, 10^{-5} m/s^2 。

3.3 航空重力异常信息提取滤波技术仍然是关键核心

航空重力仪工作在强干扰噪声背景下, 而强噪声背景下提取微弱重力异常信号是航空重力测量中需要解决的重点问题, 也是核心关键技术之一。航空重力测量中, 经过各项改正后航空重力数据通常采用低通滤波处理, 提取出消除高频干扰后有用的航空重力异常信号, 测线滤波的程度取决于原始数据的噪声和异常分辨率的要求^[14-15]。

GT 系列航空重力数据处理采用了自适应卡尔曼滤波 (Kalman filtering) 方式进行平滑滤波, 差分 GPS 高度作为观测量建立观测方程, 利用卡尔曼平滑理论进行重力异常解算^[16], 在压制干扰信号的同时更好地保留有效重力测量信息, 形成航空重力自由空间重力异常, 通常采用半波长 50 s 进行滤波, 重力异常空间分辨率 1.5 ~ 3 km (飞行速度 110 ~ 218 km/h)。

AIRGrav 航空重力数据处理使用余弦锥形 (cosine tapered) 低通滤波器按时间序列对原始测线数据进行滤波来去除统计噪声^[4], 测线滤波的程度取决于数据的噪声和分辨率的要求, 测线滤波的程度总是要小于网格化滤波, 以避免网格化时数据畸变, 通常采用半波长 50 s 的滤波器对航空重力数据进行滤波处理, 重力异常空间分辨率 1.5 ~ 3 km (飞行速度 110 ~ 218 km/h)。

国外还有一些公司采用 FIR 低通滤波技术, 但解算效果远不如 GT 和 AIRGrav 系统, 尤其是在比较颠簸的飞行条件下或起伏飞行时。

3.4 航空重力数据调平技术进一步得到发展

通常情况下, 像航磁测量一样, 航空重力测量数据只需要进行控制线法调平处理, 但由于航空重力测量在强干扰下存在着随机噪声, 为了减小随机噪声发展了微调平处理技术^[5]。

1) 控制线法调平处理

采用统计估算方法对航空重力测量控制线和测线交叉点的重力场作最大随机校正, 以补偿主要由定位误差、飞行高度变化和零漂等引起的随机水平

误差。

2) 微调平处理

对控制线法调平后的航空重力数据进行微调平,即将每条测线的噪声值从控制线法调平后航空重力数据中去除,获得了微调平处理后的航空重力异常,目的是进一步减小重力异常中的随机噪声。

3.5 航空重力地形和布格改正与地面重力改正基本一致

航空重力测量地形改正方法与传统的地面重力改正方法一样,一定程度上比地面重力改正更容易些,因为航空重力不需要近地改正,相应地不会产生因近地不规则密度而引起的误差。

地形改正既可用数字地形模型(DEM),也可用航空重力测量时获得的地形数据。国外主要使用 SRTM(shuttle radar terrain mission) 数据进行重力地形改正。SRTM 数据为空间网格 90 m×90 m 地形数

据,参考水准面为 WGS84 大地水准面模型,高程精度约±16 m,水平精度约±20 m。

SGL 公司地形改正使用 Calgary 大学大地测量开发的软件,地形改正算法使用的是同密度的 2D FFT 方法。CMG 公司利用 Oasis Montaj 地形改正模块进行布格改正和地形改正^[17],地形改正值采用 Nagy(1966) 方形域地形改正方法(中区) 和 Kane(1962) 扇形分区地形改正方法(远区) 描述的组和方法计算得来^[18]。一般选用密度 2.67 g/cm³,湖泊和海水采用密度 1.00 g/cm³。

计算出地形与布格重力改正数据后,需采用与获得航空自由空间重力异常相同滤波方式、相同滤波尺度对改正数据进行滤波,然后进行地形与布格改正,形成全测区的航空布格重力异常数据。航空重力布格改正的流程如图 5。

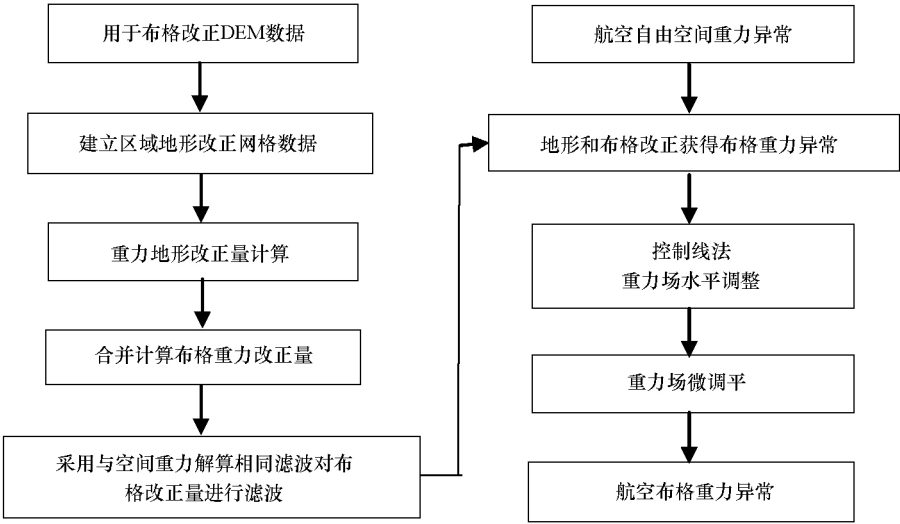


图 5 航空重力布格改正流程

Fig.5 Flow chart of Airborne gravity Bouguer correction

3.6 航空重力数据处理技术仍然处于不断改进之中

虽然国外航空重力数据处理技术已经迈开了一大步,但由于航空重力测量存在着大量的扰动干扰,不得不通过数据滤波的方式来滤除干扰,获得低频重力场信息,因而制约航空重力测量对重力异常的分辨能力,这大大地限制了航空重力的应用范围。同时,由于飞行测量时存在着大气湍流的影响,航空重力测量精度常常会明显的降低,人们一直在寻找更为合适的滤波处理方法来减少大气湍流的影响。因此,航空重力数据处理技术一直处于不断的改进之中,以寻求测量精度更高、异常空间分辨能力更好的数据处理方法^[18]。

4 国外新技术促进了我国航空重力测量技术的发展

航空重力整体发展技术国外先于我国数十年,随着航空重力测量仪的不断更新和差分 GPS 定位系统的出现,已经形成了比较成熟的航空重力测量技术,值得各国借鉴^[19]。在引进国外先进系统和技术的基础上,我国科研人员通过开展消化吸收再创新的方式,形成了我国特色的航空重力系统集成、测量方法与数据处理技术,并开展了大规模应用。

4.1 促使了我国系统集成技术迈进先进行列

在充分借鉴国外航空重力勘查系统集成经验的

基础上,我国先后自主集成出航空重力、航空重(磁)和航空重(磁、遥)等勘查系统,实现了在固定翼飞机和直升机飞行平台下的航空重力测量,促使了我国航空重力勘查系统的集成技术迈进国际先进水平。

4.2 加快了我国航空重力测量技术的发展

在充分借鉴和研究国外航空重力测量技术的基础上,我国通过大规模的航空重力应用试验,形成具有我国特色的航空重力测量技术,尤其是用于青藏高原等高山区的航空重力测量技术,加快了我国航空重力测量技术快速发展。

4.3 促进了我国航空重力数据处理技术的进步

作为航空重力测量的一项关键技术,我国从学习国外先进的航空重力数据处理开始,通过多年的摸索和研究,不仅能够熟练地使用国外进口的数据处理软件,而且自主研发出航空重力数据处理软件,促进了航空重力数据处理这项关键技术的进步,缩短了与国外的差距。

5 结论

航空重力测量采用的勘查系统、测量方法和数据处理技术直接影响着测量质量和应用效果,笔者首次全面总结归纳了国外最先进的航空重力系统集成、测量方法与数据处理技术,对提高我国航空重力测量技术水平,高质量地开展航空重力测量具有明显地促进和推动作用。

1) 全面地介绍了多类型成熟的航空重力勘查系统。本文介绍了国外基于固定翼飞机和直升机 2 类飞行平台所集成的航空重力、重(磁)、重(磁、放)等各类型的先进勘查系统,多达 30 种飞行平台几乎涵盖了目前世界上所有类型在用的航空重力勘查系统,为读者提供了更宽广、成熟的集成技术,以满足多样化测量和应用的需要。

2) 系统地介绍了多样化发展的航空重力测量方法。本文在介绍常规的同时高度平飞开展中比例尺测量的基础上,系统介绍了国外利于提高航空重力测量效果的起伏飞行测量方法,还介绍了国外发展大比例尺航空重力测量技术的最新进展,以及国外公司制定的航空重力测量内部技术要求,为读者提高航空重力测量质量和应用效果提供了相关的方法技术。

3) 详细地介绍了多途径的航空重力数据处理技术。本文介绍了差分 GPS 的解算技术,并通过与惯性系统的组合解算技术,减小系统误差,提高定位

精度;在数据滤波处理方面,介绍了强干扰条件下提取微弱重力异常的卡尔曼滤波和余弦锥形低通滤波技术,均为目前航空重力异常解算精度最高的技术。这些技术的介绍,有助于提升我国航空重力数据处理水平,同时为我国研发高精度航空重力数据处理软件提供了重要的技术支撑。

总之,本文通过国外先进的航空重力系统集成、测量方法和数据处理技术的介绍,以期帮助读者消化吸收和深度引用国外的先进技术,提升我国航空重力的测量效果和应用能力,促进我国自主研制航空重力测量技术的发展,对充分发挥航空重力在基础地质研究、油气资源调查、固体矿产勘探、环境地质调查等领域的作用,均有十分重要的意义和实用价值。

致谢:本文撰写过程中郭志宏、陈天友、姜作喜、罗锋等同志提供了资料和帮助,在此谨表谢意。

参考文献 (References) :

[1] 熊盛青,周锡华,王林飞,等.航空地球物理综合探测理论技术方法及装备[M].北京:地质出版社,2018.
Xiong S Q, Zhou X H, Wang L F, et al. Theory, technology and instruments of comprehensive airborne geophysical exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.

[2] 王静波,熊盛青,周锡华,等.航空重力测量系统研究进展[J].物探与化探,2009, 33(4):368-373.
Wang J B, Xiong S Q, Zhou X H, et al. The advances in the study of the airborne gravimetry system[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(4):368-373.

[3] France B, Martin B. Project report: airborne gravity survey QUEST south, British Columbia [D]. Vancouver: Geoscience British Columbia Society, 2009.

[4] Luise S, Stephen F. Advances in SGL AIRGrav acquisition and processing[C]//Airborne Gravity, 2010.

[5] Gabell A, Tuckett H, Olson D. The GT-1A mobile gravimeter [C]// In ASEG-PESA, Airborne Gravity 2004 Workshop, 2004: 55-61.

[6] UTS Geophysics, Airborne Petroleum Geophysics. Airborne GT-1A gravity survey for UTS geophysics acquisition and processing report survey [R]. 2009.

[7] Mogilevsky V, Pavlov S. Detailed helicopter-borne gravity [R]. Aerogeophysics Inc. Moscow. Russia, 2004.

[8] Baranyi E, Ellis R. An airborne gravity case study of the Podolsky eposit, Sudbury Basin[R]. Airborne Gravity, 2010.

[9] Youngman M. GRAV-D field operations handbook [S]. NOAA's National Geodetic Survey, 2012.

[10] Huang Y N, Arne V O, Wu M P. SGA-WZ: a new strapdown airborne gravimeter[J]. Sensors 2012, 2012, 12: 9336-9348.

[11] Liu P, Zhang K, Wu M. Research on the methods of acceleration estimation based on difference between satellites[C]// 2010 International Symposium on Inertial Technology and Navigation, 2010.

[12] 屈进红, 郭素然, 周锡华, 等. 相关性分析在 GT 航空重力仪零漂改正中的应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(4) : 838 – 842.
Qu J H, Guo S R, Zhou X H, et al. The correlation analytical method and its application to GT aerogravimeter drift correction [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40 (4) : 838 – 842.

[13] 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. Experimental researches on FIR lowpass filter based on equiripple [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(5) : 856 – 860.

[14] 郭志宏, 罗锋, 安战锋. 航空重力数据窗函数法 FIR 低通数字滤波试验[J]. 物探与化探, 2007, 31(6) : 568 – 571, 576.
Guo Z H, Luo F, An Z F, et al. Experimental researches on FIR lowpass digital filters based on Window functions of airborne gravity data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31 (6) : 568 – 571, 576.

[15] Olson D, Eng P, Geoph P. Technical note : spatial resolution of mobile gravity surveys[R]. Canadian Micro Gravity, 2012.

[16] 王静波, 熊盛青, 周锡华, 等. 利用 Kalman 平滑技术估算航空重力测量中的载体垂直加速度[J]. 地球物理学进展, 2010, 25 (3) : 968 – 974.
Wang J B, Xiong S Q, Zhou X H, et al. Estimation of the vertical acceleration for the airborne gravimetry using Kalman smoothing [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25 (3) : 968 – 974.

[17] Nancy W, Chris M. Montaj gravity and terrain correction tutorial and user guide[G]. Geosoft, 2006.

[18] Olson D. GT-1A and GT-2A airborne gravimeters: improvements in design, operation, and processing from 2003 to 2010[C]//Airborne Gravity 2010 Workshop, ASEG/PESA, Expanded Abstracts, 2010.

[19] 熊盛青. 我国航空重磁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. Resent situatio development airborne gravity and magnetic survey techniques Chinese [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1) : 113 – 117.

The latest progress in air gravity measurement and data processing technology abroad

ZHANG Hong¹, ZHOU Neng², DENG Xiao-Dan³, WANG Meng³, LI Xing-Su³

(1. Beijing Information Technology School of Information Management, Beijing 100192, China; 2. Beijing Super-sonic Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China; 3. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: As a new geophysical exploration technology, airborne gravity has developed rapidly. It is of great significance and practical value to master the latest foreign technology for carrying out this survey and research in China and catching up with the advanced world level. In this paper, for the first time, the latest airborne gravity survey and data processing technologies abroad were comprehensively studied and summarized. The most advanced systems integration, survey methods and data processing technologies abroad were systematically introduced. The analysis and comparison were carried out, and the future development trend was prospected. Therefore, readers can fully understand the most advanced airborne gravity technology abroad, and directly and deeply use these technologies in survey and research, so as to promote and push forward the development of airborne gravity technology in China.

Key words: airborne gravity; measurement methods; data processing technology

(本文编辑:王萌)