doi: 10.11720/wtyht.2023.1289

屈进红,姜作喜,周锡华,等. 基于直升机航空重力同步地形的布格改正处理[J]. 物探与化探,2023,47(2):447-457. http://doi.org/10.11720/ wtyht. 2022. 1289

Qu J H, Jiang Z X, Zhou X H, et al. Airborne Bouguer gravity based on synchronous terrains surveyed using helicopter airborne gravimetry [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2):447-457. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2022. 1289

# 基于直升机航空重力同步地形的布格改正处理

屈进红<sup>1,2</sup>,姜作喜<sup>1,2</sup>,周锡华<sup>1,2</sup>,王明<sup>1,2</sup>,罗锋<sup>1,2</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)

摘要:重点勘探区内大规模的采矿活动从未间断过,矿山采空区、排土场和尾矿库等处在不断形变过程中。仍依 靠搜集数字地形的方式,无法做到地形数据与航空重力测量数据的良好匹配,给航空重力地形改正和中间层改正 带来极大的改正误差。本文通过直升机重磁测量系统的飞行 GNSS 大地高与无线电离地高度进行求差,再转换到 正常高,最后经过调平和精细化处理获得同步实测地形。又与搜集的多种地形数据一起对比 ICESat-2/ATL08 星 载激光高程,实测地形 Wxd100 和 Wxd400 的高程精度分别为 5.33 m 和 8.93 m。使用实测地形进行航空重力布格 改正后,矿区和多条典型测线的数据质量有了明显改善。

关键词:航空重力测量;同步;实测地形;布格重力;矿山

中图分类号: P631.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2023)02-0447-11

0 引言

20世纪90年代初期至今,随着差分全球定位 技术(DCNSS)的成熟,航空重力仪及测量技术才得 到迅速发展<sup>[1-2]</sup>。航空重力测量以飞机为载体,融 合了重力传感器、惯性系统(INS)和 DGNSS等技 术,获取近地空中重力加速度的一种动态重力测量 方法<sup>[3-6]</sup>。航空重力测量数据进行多项处理后才能 更好反映地下密度分布的重力异常,为重力反演和 后期应用做好准备。布格改正利用高精度数字高程 模型(DEM)进行地形改正和中间层改正后,把重力 异常归算到大地水准面上,是数据处理中的重要环 节。因此,获取精准的地形高程是提升布格重力的 改正质量的关键。

航空重力布格改正中,一般使用1:25 万或更大 比例尺的数字高程模型<sup>[1]</sup>,对于大部分测区都能满 足改正需求。但在重点勘探区内,多处大型新、老矿 场的大规模采矿活动从未间断过,区内存在多处采 空区、排土场和尾矿库等;又随着城镇化建设,区内 的居民住宅、商业高楼拔地而起,这些因素在不同程 度上改变和重塑着地质形态,像人类开发活动频繁、 地表高程破坏严重的测区,若仍依靠传统搜集数字 地形的方式,则会由其制作年代久远、地形高程改变 速度太快或地形数据更新滞后等原因,使搜集的地 形数据无法与航空重力测量数据进行同步匹配,贸 然使用会带来极大的改正误差。

本文使用加大量程后的俄罗斯 GT-2A 航空重 力仪,其抗颠簸能力比 GT-1A 得到增强<sup>[7-8]</sup>。国内 首次集成了直升机重磁测量系统,并采用离地 200 m 高度随地形起伏飞行,在重点勘查实验区开展直升 机航空重磁测量。系统搭载了 DGNSS 系统、单点 GNSS 定位导航系统和 TRA 3000 无线电雷达高度 计等测高设备,通过机载 GNSS 飞行高度与无线电 离地高度进行求差,再进一步处理后获得同步实测 地形。使用实测地形进行航空重力布格改正后,矿 山周边因地形不匹配造成布格重力假异常的现象被 消除,处理结果获得明显提升。

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-09-09

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0601705、2017YFC0601706)

第一作者:屈进红(1981-),男,正高级工程师,主要从事航空重力测量与方法技术研究。Email:qunjant007@163.com

1 实验区概况与地形数据处理

#### 1.1 实验区地形概况

实验区位于鞍山一本溪整装铁矿勘查区,该区 属我国重点勘探地区,已知东西鞍山、齐大山等多个 特大型铁矿,其分布范围广、规模大、矿体与围岩之 间具有明显的密度差。测区中心位置为鞍山市,测 区东南高、西北低,东南部为山区,最高峰位于测区 中南部海拔 520 m。西北部为低缓平原地带,一般 高度在 40~80 m。区内东西鞍山、齐大山、大孤山、 小岭子和眼前山多处开采的铁矿区等在不断形变 中,并且城市高层建筑也在陆续升起。

为验证多个不同时期的数字地形对实验区航空 重力布格改正的影响,本文搜集了国家地理信息局 的1:25万、1:5万 DEM 和3种全球典型的免费开放 DEM 数据(ASTER、SRTM 和 AW3D30),后 3 种数据 的空间分辨率均为 30 m.基本信息见表 1。ASTER GDEM 数据采用 2019 年发布的 V3 版产品,是世界 上最先免费发布的全球 30 m 尺度的 DEM 数据.数 据精度检验:在日本区域高程精度为12.6 m。 SRTM DEM 属于雷达产品,平面精度 20 m,高程标 称精度 16 m,实际精度约 9 m<sup>[9]</sup>,于 2000 年由美国 "奋进"号航天飞机采集,SRTM 数据按精度可以分 为 SRTM1 和 SRTM3, 对应的分辨率分别为 30 m 和 90 m。AW3D30 DEM 由日本宇宙航空研究机构 (JAXA)研制,它源自 ALOS 卫星搭载的全色遥感立 体测绘仪(PRISM)采集了 300 万个场景的光学立体 像对数据,首先生成全球 5 m 的数字地表模型 (DSM),平均精度为 3.4 m,并以此重采成 30 m 尺 度的数据于 2015 年 5 月免费发布,高程精度为 5 m<sup>[10]</sup>,实际精度约 4.4 m,被称为 30 m 尺度上精 度最高的全球免费 DEM 产品,并覆盖全球所有的土 地尺度。

图 1 为经过大孤山矿坑的测线 L1710 上部分搜

#### 表1 全球公开版 30 m 分辨率 DEM 基本参数

Table 1 Basic parameters of the global public

version	of 30	m	resolution	DEM
---------	-------	---	------------	-----

	ASTER	SRTM1	AW3D30
水平基准	WGS84	WGS84	GRS80
高程基准	EGM96	EGM96	EGM96
空间分辨率/m	30	30	30
高程精度/m	12.6	9	4.4
覆盖范围	$83^{\circ}N \sim 83^{\circ}S$	$60^\circ\mathrm{N}\sim56^\circ\mathrm{S}$	$84^\circ\mathrm{N}\sim84^\circ\mathrm{S}$
采集技术	立体像对	InSAR	立体像对
采集时间/年	1999~2008	2000	2006~2011
使田版木	V3	V3	V2 2

集的 DEM 数据与实测地形的对比,图中可以看出 1:25 万数据存在多处阈值设置,分辨率和精度都比 较差,实验中排除此项数据。1:5万数据具有 25 m 的最好分辨率,但从矿坑开采程度推测数据制作时 间应早于 2000 年 2 月份采集的 SRTM1。而 L1710 的 Wxd100 实测地形为直升机航空重磁勘查系统同 步获取,它的作业时间为 2013 年 12 月。从 1:5万、 SRTM1 和 Wxd100 数据中,可以观察到矿坑不断加 深和排土场、尾矿库不断垒高的动态变化。鉴于地 表形态在不同时期改变较大的情况,搜集滞后的数 字地形进行布格改正显然变得不合理。



## 图 1 测线 L1710 上部分搜集 DEM 数据与实测地形对比 Fig. 1 Comparison of DEM data collected on survey line L1710 with actual topography

本文制作的实验区地形参考椭球参数为 WGS84,高程基准采用EGM96模型。其中1:5万的 DEM采用2000国家坐标系,采用1985国家高程基 准;AW3D30的参考椭球为GRS80。在计算前,不同 数据之间首先统一不同的参考椭球和高程基准,有 文献表明这3种不同的椭球参数之间参考系差异极 小,同一点的定位精度优于1 mm<sup>[11]</sup>;而1985高程 基准面与全球高程基准的差异大概在21~46 cm 之 间<sup>[12-15]</sup>。

#### 1.2 实测地形数据制作

1.2.1 实测地形测量原理

无线电雷达高度计作为指导飞机保持一定离地 高度飞行的一种辅助设备,经常使用在航空物探低 空起伏飞行中。它测得的是飞机离地面的高度,称 为净空高度 $H_F$ ,它与正高H、大地高h、地形高 $H_T$ 及 大地高到正高的改正值N之间的关系,如图 2 所 示。P为测线上的一点, $PP'=H_F$ ,PQ=H, $P'Q=H_T$ ,  $PQ_0=h$ , $Q'Q_0=N$ ,若忽略垂线偏差的影响,几何关系 如下:

$$H = H_F + H_T = h - N \quad , \tag{1}$$

$$H_T = h - N - H_F \quad (2)$$



图 2 高程之间的相互关系

Fig. 2 Relationship between elevations

式(2)表明,若测得飞机的 GNSS 大地高和离地 净空高度,可获得飞机测点下方对应的地形高数据。 然而,航空重力测量主要用于测定地面作业困难地 区的地球重力场<sup>[16]</sup>,而部分区域的 DEM 往往更新 程度不够,难以实际应用。

1.2.2 实测地形处理与实现

根据上述测量原理,首先从正、反方向重复测线 的错位地形曲线中确定无线电高度数据的滞后时 间,进行滞后校正后获得初步实测地形,见图 3a。 图中存在着明显的水平条带差异,与航空地球物理 勘探中的航空磁法、航空重力等情况不尽相同,但均 表现为一系列沿测线方向的条带状干扰,采用航空 地球物理中常用的切割线调平和微调平方法,并设 置适宜的调平参数,可以处理条带干扰问题。

为此在测线方向布置一定量的切割线,通过测 线与切割线交叉点处的差值调整测线间水平差异, 广泛使用的是切割线调平<sup>[17-19]</sup>,此处通过交叉点对 切割线进行1阶斜改后再对测线调平,如图3b所 示。切割线调平主要用于水平差异较大的数据调 整,调平后仍存在一定的残留水平差,还需进一步采 取微调平<sup>[20-21]</sup>。微调平采用频率域与空间域组合 滤波,相对于切割线调平,微调平处理更为灵活,对 数据的理解和经验性成分较多。Ferraccioli等<sup>[21]</sup>介 绍了Oasis Montaj 中采用的滤波器,从网格数据中 采用余弦方向滤波加高通巴特沃斯滤波器分离出条 带干扰,公式如下:

$$D(\theta) = 1 - \left[\cos(\alpha - \theta + \pi/2)\right]^n , \quad (3)$$

$$B(k) = 1 - \frac{1}{1 + (k/k_0)^n} , \qquad (4)$$

其中:式(3)是频率域  $\alpha$  方向上 n 阶方向滤波器;式 (4)是 n 阶高通巴特沃斯滤波器; $\theta_k$  分别是圆波数 和波数; $k_0$  对应高通滤波的波数。 $\alpha$  应选择沿测线 方向,通常方向滤波器阶数取2,巴特沃斯滤波器阶



a— 初步实测地形;b—切割线调平后实测地形;c—微调平后实测地形;d—剥离城市高楼后实测地形 a—initially obtain the actual surveyed terrain; b—actual surveyed terrain is levelled by the tie-line; c—actual surveyed terrain is levelled by microlevelling process; d—actual surveyed terrain after stripping off tall buildings



数取6.波长为4~10倍测线间距(此处设置4,数据 质量越差参数依次增大)。按照上述滤波器组合提 取图 3b 中的剩余条带,图 4 则为提取的残留水平 差,可以看出提取的并非只有条带干扰,还包含大量 的低幅高频 DEM 信息, 与图 3b 的 DEM 轮廓基本一 致。由于噪声干扰和 DEM 信息所处的频带通过频 率域滤波不可能彻底分离,还需进一步提取和分离 条带干扰。此处使用 Naudy 等提出的非线性滤波处 理方法<sup>[22]</sup>,其中 Naudy 滤波长度为测线间距的 5 倍,高程幅值的滤波阈值设为2m,如图5所示已剔 除 DEM 高程轮廓信息的条带干扰,也可以通过多项 式拟合、样条插值和中值滤波等方法处理[23]。经过 一次微调平后,测线间尚残存少量的水平差,可重复 上述过程直至获得合理的结果,如图 3c。由于微调 平处理并不针对特定航空地球物理资料,条带干扰 不管是飞行高度差异还是仪器等其他因素引起,方 法本身均适用。

通过无线电高度计测量获取的是地表高程,城 市高楼和高大植被等地表信息也都包含在实测地形 中,这些信息也会影响到地形改正。因此,参考多个 不同时期的高分辨率 DEM 数据,以早期1:5万 DEM 和 SRTM1 数据为主,对鞍山市区超过20 m 以上的 小高层、高层建筑进行替换或剥离,如图 3d 所示。

从图 6 中看出 5 种不同时期的地形数据所对应 的矿场开采程度也不尽相同。在获得实测地形后为

(b)

(e)

122° 50'

123°10′

123°00'

经度

(a)

(d)

122°50

 $41^{\circ}10'$ 

41°00

 $41^{\circ}10'$ 

 $41^{\circ}00$ 

重速

重重





经度

a-1:5万地形数据:b-ASTER 数据:c-SRTM1 数据:d-AW3D30 数据:e-SRTM3 数据:f-实测地形与 SRTM1 缝合

123°00

123°10′

122°50'

Fig. 6 Multi-source DEM data and the actual surveyed terrain after stitching SRTM1

15

11

123°10′

123°00'

经度

· 450 ·

满足地形改正的范围要求,需要与测区外围 DEM 数据进行网格缝合。图 6f 为实测地形与 SRTM1 外围数据缝合后的地形数据,白色线框为缝合边界,5 处矿场和鞍山市区也在其中。

### 1.3 地形数据精度评价

1.3.1 实测地形测量分项评价

实测地形由飞行 GNSS 大地高与无线电离地高 度求差后获得,其误差主要来自于这两者的测量误 差<sup>[24]</sup>。航空重力测量系统采用 Ashtech Z-Xtrime 的 DGNSS 移动站(移动站同时为机载导航定位系统和 航磁数据定位提供 GNSS 信号)和 Z-Max 的 DGNSS 地面基站组成差分全球定位系统,差分定位结果则 用于航空重力中垂直加速度误差改正和航重数据定 位。在开工和飞行期间,分别对地面基站和移动站 进行了 3 次单点 GNSS 和 2 次 DGNSS 的定位静态 测试,观测时间均在 2 h 以上,观测统计静态单点 GNSS 高度误差在 2~5 m,静态 DGNSS 高度误差在 0.02 m 之内,见表 2。

雷达高度计作为一种成熟的传感器在航空领域 已经有 70 多年的应用历史,是通过无线电波的反射 来测量高度的设备,它由发射、接收装置组成。本文 测量系统中搭载美国 Trimble 公司 TRA-3000 雷达 高度计,根据离地 200 m 起伏飞行高度,由说明书提 供的 7%离地误差公式推算,测量精度小于 14 m。

#### 表 2 定位静态观测标准差(STD)统计

 Table 2
 Static measurement standard deviation (STD)

	序号	东向距/m	北向距/m	高度/m	水平面/m
	1	0.699	0.995	2.315	1.216
单点 GNSS 基站	2	0.599	1.395	2.632	1.519
	3	0.565	1.390	2.366	1.500
	1	1.292	2.817	4.839	3.099
单点 GNSS 移动站	2	1.071	2.241	3.268	2.484
	3	1.061	1.817	3.456	2.104
DONCE 移动計	1	0.010	0.007	0.006	0.012
DGN55 移幼站	2	0.002	0.003	0.006	0.003

#### 1.3.2 实测地形动态测量评价

Wxd100 实测地形从航磁测网中提取的测线间 距为100 m,飞行高度由 GNSS 单点定位提供;而 Wxd400 从航重测网提取的测线间距为400 m,飞行 高度由 DGNSS 差分定位提供。航空重复线测量常 用于评估仪器动态测量的实际精度及仪器稳定性的 一种测试方法,也适用于地形数据的重复线精度评 价。图 7 中,从航空重力仪重复线动态精度测试中 提取出一组重复地形数据,在大地高400 m 平飞下, 地形相对变化约170 m,对地形重复线的质量评价 采用内符合统计<sup>[25]</sup>。地形重复线的均方根差



repeated lines of elevation

(RMSE)为2.55 m,经内符合水平调整后 RMSE 为2.53 m。

Wxd100 和Wxd400 实测地形中都布设了测线 和控制切割线<sup>[26]</sup>,通过对调平前的测网交叉点进行 质量评价,可以评价实测地形的区域性高程精度,见 表 3。表中 Min 为最小值、Max 为最大值、ME 为平 均误差、STD 为标准差、RMSE 为均方根差(视切割 线为真值);表中交叉点总精度计算方法采用航空 物探技术规范的统计方法,将所有交叉点的差值平 方和除以 2 倍的交叉点数后再开平方<sup>[27]</sup>。

#### 表 3 实测地形中测网交叉点统计

#### Table 3 Statistics of survey network intersections

of actual surveyed terrain

Wxd400	Wxd100
609	4762
-33.15	-91.7
67.75	98.6
0.03	0.61
5.71	7.97
5.71	7.99
4.04	5.65
	Wxd400 609 -33.15 67.75 0.03 5.71 5.71 4.04

1.3.3 基于 ICESat-2/ATLAS 下的高程精度评价

ICESat-2/ATLAS 是目前高程精度最高的星载 激光数据,能够作为生产高精度全球地面参考高程 的基础数据。2018 年 9 月,美国国家航空航天局 (NASA)发射了 ICESat-2 卫星,其搭载的激光载 荷——先进地形激光测高系统(ATLAS),相比 ICESat-1/GLAS 具有更高的精度和更小的激光足印,足印 直径约为 17 m,沿轨足印间距 0.7 m,采用 6 波束激 光对地面探测,每两束强、弱一组,两束相间 90 m, 每组相间约 3.3 km<sup>[28]</sup>。强弱光束形成交叉测量, 能够有效提高对坡度和地表高程变化的检测能 力<sup>[29]</sup>,高程精度由 1 代的 15 cm 提升到 10 cm,完全 满足对搜集的多源 DEM 数据和实测地形高程精度 评价的需求。 本文使用 2021 年 4 月发布的 ICESat-2/ATL08 高程 V4 版本,存储了陆地高程和冠层高度数据,覆 盖范围为全球,下载网站 https://nside.org/data/ atl08/versions/4。ATL08 数据在实验区内分布了 4 条轨道:186、628、651 和 1093,采集时间从 2019 年 1 月~2021 年 1 月。每条轨道在此时间段内扫描 8~ 10 次左右,每次扫描生成 6 束激光,而且扫描轨迹 与上一次比较都在轨道附近发生一定的偏移,如图 8 所示紫色激光束分布在实验区的各个角落。并剔 除了部分信号弱的光子、实验区内数据极少和无数 据的激光束。

从激光束中提取 ATL08 高程后,分别与 Wxd100、Wxd400、1:5万 DEM 和免费开放的 DEM 数据(SRTM1、AW3D30、ASTER 和 SRTM3)进行高 程精度统计。ICESat-2 测高数据的精度与成像时 间、坡度、地表覆盖、信噪比等因素有关,其中高程精 度随坡度的上升而显著下降;夜晚观测数据的高程 精度高于白天;裸地的高程精度高于植被覆盖的区 域,植被覆盖率越高,高程精度越低<sup>[30]</sup>。表4中调 整前的统计结果,则保留了矿场周边和城市区域的 ATL08 数据,Wxd100表明实测数据质量确实好于所 有收集的数据。为进一步验证实测数据与其余



图 8 轨道上 ATL08 激光数据在实验区分布 Fig. 8 Map of ATL08 Laser data on the track in the experimental area

DEM 的质量水平,剔除了形变大的区域和含有跳点的 ATL08 数据,保留率约 87%;调整后统计 Wxd100的高程精度(RMSE)好于 ASTER,略低于其他 DEM;Wxd400的高程精度与 ASTER 相当,低于其他 DEM。

又经过地形分类,分别对平原、丘陵山区的区域 进行了精度统计。表 5 表明,两个实测地形的平原 地区精度好于 3 m,远优于 ASTER,与其他 DEM 精 度相当;而实测地形的丘陵、山区地带的精度下降程

		Wxd100	Wxd400	SRTM1	AW3D30	ASTER	1:5万	SRTM3
	点数/个	22162	20456	22745	22745	22745	22745	22745
	Min/m	-116.87	-111.62	-125.98	-123.49	-125.37	-142.56	-123.73
油軟品	Max/m	149.7	149.24	230.99	228.2	226.68	284.35	229.89
<b></b> ••一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	ME/m	1.54	2.42	-0.75	2.1	-4.2	-0.46	-0.31
	STD/m	9.79	12.33	14.88	11.24	14.59	17.86	14.92
	RMSE/m	9.91	12.56	14.90	11.43	15.18	17.87	14.93
	点数/个	19279	17720	19848	19848	19848	19848	19848
	Min/m	-27.13	-83.83	-24.84	-21.56	-55.45	-38.24	-27.56
油軟戶	Max/m	44.9	80.03	37.94	49.86	39.72	53.54	35.72
- 师登/ 口	ME/m	1.37	2.4	-0.51	2.08	-4.09	-0.05	-0.06
	STD/m	5.15	8.60	3.66	3.78	7.84	4.39	4.07
	RMSE/m	5.33	8.93	3.69	4.31	8.84	4.39	4.07
	采集时间	2013. 10~2014. 1	2013. 12~2014. 1	2000. 2	2006~2011	1999~2008	不详	2000. 2

表	₹4	基于 ICESat-2	ATL08	下的多源 D	EM 数据统计	
Table 4	Mult	ti-source DEM	data stati	stics based	on ICESat-2	/ATL08

表 5 基于 ICESat-2/ATL08 下的多源 DEM 数据分区统计 Table 5 Multi-source DEM data partition statistics based on ICESat-2/ATL08

				pur nuon su			1200	
		Wxd100	Wxd400	SRTM1	AW3D30	ASTER	1:5万	SRTM3
	点数/个	9894	9048	10220	10220	10220	10220	10220
	Min/m	-27.13	-83.83	-24.84	-21.56	-55.45	-38.24	-27.56
丘陵	Max/m	44.9	80.03	37.94	49.86	38.37	53.54	35.72
及山区	ME/m	2.48	3.62	0.3	2.61	-6.71	1.33	0.8
	STD/m	6.71	11.74	4.75	4.83	8.35	5.69	5.40
	RMSE/m	7.15	12.28	4.76	5.49	10.71	5.84	5.46
	点数/个	9313	8613	9547	9547	9547	9547	9547
	Min/m	-10.45	-15.84	-14.84	-9.24	-25.31	-15.87	-14.98
亚百	Max/m	35.01	49.27	16.46	46.54	39.72	20.52	17.1
十原	ME/m	0.21	1.13	-1.35	1.54	-1.21	-1.49	-0.96
	STD/m	2.14	2.23	1.52	2.07	6.08	1.20	1.29
	RMSE/m	2.15	2.50	2.03	2.57	6.20	1.91	1.60

度高于其他 DEM。在丘陵、山区中, SRTM1<SRTM3 <AW3D30<1:5万 DEM, 精度依次降低, 但相差不 大; Wxd100 的高程精度略低于前 4 种地形数据, Wxd400 的高程精度稍差于 ASTER。

2 航空布格重力改正及评价方法

#### 2.1 航空重力地形改正原理

以航空重力飞行测点 P 为观测点,垂直地面投 影测点 P'的水平面内,如图 9 所示,P'点周围任一 不在投影面上的质量单元 dm 对观测点 P 产生的重 力异常采用方形域改正方法<sup>[1]</sup>。

$$\Delta g_{z} = G \int \frac{\mathrm{d}m}{r^{2}} \cos\theta = -G\rho \iint \frac{\zeta - z}{\left[ \left(\xi - x\right)^{2} + \left(\eta - y\right)^{2} + \left(\zeta - z\right)^{2} \right]^{3/2}} \mathrm{d}\xi \mathrm{d}\eta \mathrm{d}\zeta \quad , \tag{5}$$

其中 *G* 为万有引力常数; $\theta$  为 *P* 点与 dm 连线到 *Z* 轴的夹角, cos $\theta$  = - ( $\zeta$  - *z*) /*r*;*r* 为 dm 到 *P* 点距离,  $r = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2};$  dm =  $\rho$ d $\xi$ d $\eta$ d $\zeta$ ; $\rho$  为密度。

上述公式计算复杂,一般采用近似积分的方法 将投影测点 P'为中心的四周地形再次分割成许多 小块,计算出每一小块地形质量对测点 P 的重力改 正值,然后累加求和便得到该点的地形改正值。

航空重力地形改正目前国内没有明确的要求, 主要参考地面重力规范。本文使用加拿大商业地球 物理软件 Oasis Montaj 地形改正模块处理,航空重 力异常地形改正通常分为局部地形改正范围和区域 地形改正范围,局部地改范围半径应在 0~20 km,区 域地改范围半径应在 20~166.7 km 之间不等,一般 根据地形特点、任务要求选择最远半径<sup>[31]</sup>。

#### 2.2 航空布格重力计算

通过合并地形改正值和中间层改正值就获得布 格重力改正值,采用直升机航空重力的波长分辨率 (飞行速度除以2倍的滤波截止频率<sup>[32]</sup>)对改正值 进行滤波,航空重力异常减去改正值就获得航空布 格重力异常。中间层改正和航空布格重力的计算公 式来自 Oasis Montaj 地改模块说明书:

$$g_{sb} = 0.\ 0419088 \cdot [\rho h_s + (\rho_w - \rho)h_w + (\rho_i - \rho_w)h_i] \quad , \quad (6)$$

 $g_b = g - g_{sb} - g_t \quad , \tag{7}$ 

其中, $g_{sb}$ 为布格改正值; $\rho$ 为岩石密度; $\rho_w$ 为水密度; $\rho_w$ 为水密度; $h_s$ 为观测点到平均海平面的高度;  $h_w$ 为水深(包括冰厚度); $h_i$ 为冰厚度; $g_b$ 为航空布 格重力异常;g为航空重力异常值; $g_i$ 为地形改正值。



#### 2.3.1 航空布格重力外符合精度评价

利用已认可仪器测量出的物理场或由地面物探 仪器测量数据向上延拓到同一测量高度上,与测线 上航空重力场值进行对比,评价测线航空重力质 量<sup>[25]</sup>。具体做法:将某测线上测点的航空重力场值 与其对应的地面标准场向上延拓到飞行高度后的差 值,同时将测线对应标准场的水平均值作为基准去 调整测线重力场的水平差,统计去水平后差值的均 方根差,计算公式为:

$$RMSE = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left[ (F_i - \bar{F} + \bar{P}) - P_i \right]^2}{n}},$$

$$(i = 1, 2, \dots, n),$$
(8)

其中,*n* 为测线与对应标准场的重复线公共段的测 点数;*F<sub>i</sub>* 为测线上各测点的观测值;*P<sub>i</sub>* 为测线上各 测点对应的标准场。 $\overline{F} = \sum_{i=1}^{n} F_i/n$  为测线的平均值,  $\overline{P} = \sum_{i=1}^{n} P_i/n$  为测线对应标准场的平均值。 2.3.2 航空布格重力外符合总精度评价

上述外符合精度评价针对某条测线,而对所有 测线或测区进行航空重力面积性外符合总精度评 价,计算过程与式(8)类同,处理对象有所区别。其 中,n为所有测线与对应标准场公共的测点数, $F_i$ 为 所有测线上各测点的观测值, $P_i$ 为所有测线上各测 点对应的标准场, $\bar{F} = \sum_{i=1}^{n} F_i/n$ 为所有测线的平均 值, $\bar{P} = \sum_{i=1}^{n} P_i/n$ 为所有测线对应标准场的平均值。



#### 3 实验结果与分析

本文使用了 1:5万 DEM、ASTER、SRTM1、 AW3D30和 SRTM3地形数据,分别设为 A1~A5;制 作的实测地形 Wxd100与上述地形数据进行缝合 后,分别设为 B1~B5;Wxd400与 SRTM1 缝合设为 B6。分别对这些地形数据展开航空重力布格改正, 对地面 1:5万大比例尺重力数据采用快速傅里叶变 换(FFT)向上延拓至 200 m 飞行高度,并进行外符 合评价。

表6中,A1~A5进行布格改正后的外符合精度,主要与原先地形质量和采集时间有关。与实测地形进行缝合后 B1~B5,因实测地形仅改善了矿区周边和市区的局部区域,所以面积性的外符合总精度提升幅度不大。A5的分辨率比 A3低,而对应的外符合总精度相当;缝合后的实测地形中 B3与 B6外符合总精度相差也不大。表7中,分别进行了地形之间的布格重力差值统计。结果表明 A1 与 B1、A2 与 B2 之间布格重力改善最明显,然后依次是 A3

与 B3、A4 与 B4、A5 与 A3 和 B3 与 B6,均验证了上述观点,详见表 7、图 10。

从实验区随机挑选出经过矿区的测线,统计了 3个不同时期的地形和缝合实测地形后对应的布格 重力外符合精度。表8表明,使用实测地形数据后, 布格重力质量均有了明显的改善,部分测线质量的

表 6 不同地形数据改正下的航空布格重力外符合总精度 Table 6 The total accuracy of external coincidence for

airborne Bouguer gravity by different DEM data

序号	高程地形	分辨率/m	外符合总精度/ (10 <sup>-5</sup> m・s <sup>-2</sup> )	采集时间
A1	1:5万	25	1.159	早于 2000
A2	ASTER	30	1.305	1999~2008
A3	SRTM1	30	1.098	2000.2
A4	AW3D30	30	1.063	2006~2011
A5	SRTM3	90	1.097	2000. 2
B1	1:5万_Wxd100	25	1.056	测区同步
B2	ASTER_Wxd100	30	1.090	测区同步
B3	SRTM1_Wxd100	30	1.054	测区同步
B4	AW3D30_Wxd10	0 30	1.057	测区同步
В5	SRTM3_Wxd100	90	1.056	测区同步
B6	SRTM1_Wxd400	30/80	1.059	测区同步

表 7 对应地形之间的布格重力差值统计 Table 7 Statistics of Bouguer gravity difference between two DEM data

	B1~A1	B2~A2	B3~A3	B4~A4	B5~A5	A5~A3	B6~B3
$Min/(10^{-5}m \cdot s^{-2})$	-5.281	-2.329	-3.800	-1.356	-3.746	-0.122	-0.562
$Max/(10^{-5} m \cdot s^{-2})$	4.887	2.646	3.693	1.194	3.728	0.019	0. 524
$ME/(10^{-5}m \cdot s^{-2})$	-0.206	-0.608	-0.201	0.063	-0.177	-0.048	-0.061
$STD/(10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.589	0.581	0.420	0.242	0.412	0.007	0.126



Fig. 10 Difference map of Bouguer gravity anomaly difference between two DEM data

#### 表 8 典型测线在不同地形数据改正下的航空布格重力外符合精度

#### Table 8 The external coincidence accuracy of airborne Bouguer gravity under different DEM data for typical lines

								$(10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
线号	1:5万	SRTM1	AW3D30	1:5万_Wxd100	SRTM1_Wxd100	AW3D30_Wxd100	SRTM1_Wxd400	地形改变
L1990	0.801	0.669	0.645	0.649	0.646	0.650	0.680	排土场
L2070	1.077	0.863	0.811	0.785	0.786	0.786	0.800	矿坑、尾矿库
L2110	1.080	0.913	0.874	0.862	0.862	0.861	0.870	矿坑、尾矿库
L2230	1.126	0.915	0.677	0.644	0.645	0.645	0.672	尾矿库、城市建筑
L2270	1.351	1.104	0.783	0.672	0.673	0.677	0.720	尾矿库、排土场
L2550	1.870	1.592	1.141	1.044	1.041	1.047	0.905	矿坑、排土场
L2590	1.849	1.565	1.059	0.947	0.945	0.951	0.933	矿坑、排土场
T9130	1.561	1.361	0.974	1.064	1.036	1.056	1.084	两处矿坑
T9140	1.699	1.308	0.747	0.672	0.672	0.676	0.665	排土场、尾矿库





提升幅度很大。图 11 中,测线 L2270 展示了在实测 地形 SRTM1\_Wxd100 和 SRTM1 下,分别对应与地 面向上延拓后的布格重力异常曲线,外符合精度从 1.104×10<sup>-5</sup>m/s<sup>2</sup> 提升到 0.673×10<sup>-5</sup>m/s<sup>2</sup>,实测地形 对排土场和尾矿库上方的布格重力有着较大的改善 作用。

## 4 结论

本文通过 GNSS 高度数据和雷达高度计获取地 形数据,结合多源 DEM 数据进行质量评价后,并进 行航空重力布格改正,得出以下结论:

1)采用 GNSS 高度数据和雷达高度计获取地形 数据的方法,不仅作为航空重力测量中副产品没有 额外成本,而且解决了航空重力地形改正中重力数 据与地形数据同步匹配的难题。同时,对实测地形 的调平处理中采用了 Naudy 非线性滤波分离了条带 干扰,有效保留了低幅高频信息,提升了实测地形的 高程精度。

2)实测地形的重复线内符合统计精度为 2.53 m;

Wxd100 的测网交叉点的总精度为 5.65 m, 与基于 高质量 ICESat-2/ATL08 下的 RMSE 为 5.33 m 较为 接近; Wxd400 的测网交叉点总精度为 4.04 m, 而基 于激光数据下的 RMSE 为 8.93 m, 偏差较大的原因 为 Wxd400 测线间距过稀网格插值所致。使用不同 的评价方法有其适用性,评价结果较为可靠。

3) 在实验区和丘陵、山区中实测地形精度, SRTM1<SRTM3<AW3D30<1:5万 DEM<Wxd100,精 度依次降低,分别为 3. 69、4. 07、4. 31、4. 39、5. 33 m 和 4. 76、5. 46、5. 49、5. 84、7. 15 m,实测地形 Wxd100 的精度略低于前几种地形,但相差不大。 SRTM3 作为 90 m 分辨率地形数据的精度优于 AW3D30 和 1:5万 DEM,它们均可用于实测地形的 外围数据中。而 ASTER 数据存在较多异常的高程 值,对地形表达的准确性远不如前者们。

4) 统计了地形数据 1:5万 DEM、ASTER、 SRTM1、AW3D30 和 SRTM3,分别对应的航空布格 重力外符合总精度,在高程精度相当的前提下,布格 重力改正质量的高低与使用的地形数据生产时间离 航空重力测量时间的远近有关。缝合实测地形 Wxd100 和 Wxd400 后,所有地形对应的布格重力质 量都获得了一定的提升。SRTM3 的分辨率比 SRTM1 降低了,但对应的布格重力质量没有降低。 实测地形 Wxd100 和 Wxd400 在缝合 SRTM1 后,400 m 测线距的实测地形对应的布格重力质量略低于前 者。

5)本文使用实测地形进行航空重力地形改正 和中间层改正后获得航空布格重力异常,采用向上 延拓地面布格重力与全区和多条测线进行布格重力 的外符合精度评价,验证了实测数据的可靠性。表 明航空重力测量作业中同步获取地形数据用于布格 改正的方法有效且实用,可以消除矿山周边布格重 力的假异常现象。

6)航空重力布格改正的质量主要取决于地形数据的质量,而实测地形高程精度局限于雷达高度计的精度、测线间距设计等原因。将来搭载像机载激光雷达更高精度的测高设备时,势必会获取与航空重力数据同步的厘米级地形数据,可以大幅度地提升航空重力布格改正精度。

#### 参考文献(References):

[1] 熊盛青,周锡华,郭志宏,等.航空重力勘探理论方法及应用 [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 the airborne gravity processing [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.

- [2] William R G. An historical review of airborne gravity [J]. The Leading Edge, 1998(1):113-116.
- [3] 吴美平,张开东. 基于捷联惯性导航系统/差分全球定位系统的航空重力测量技术[J]. 科技导报,2007,25(17):74-80.
  Wu M P,Zhang K D. Technology of airborne gravimetry based on SINS/DGPS[J]. Science & Technology Review,2007,25(17):74-80.
- [4] Verdun J, Bayer R, Klingelé E E, et al. Airborne gravity measurements over mountainous areas by using a Lacoste & Romberg airsea gravity meter[J]. Geophysics, 2002,67(3):807-816.
- [5] Bell R, Coakley B, Stemp R. Airborne gravimetry from a small twin engine aircraft over the long island sound [J]. Geophysics, 1991, 56(9):1486-1493.
- [6] Schwarz K P, Colombo O, Hein G, et al. Requirements for airborne vector gravimetry[C]//From Mars to Greenland: Charting Gravity with Space and Airborne Instruments, 1992.
- [7] Studinger M, Bell R, Frearson N. Comparison of AIRGrav and GT-1A airborne gravimeters for research applications[J]. Geophysics, 2008,73(6):151-161.
- [8] Olson D. GT-1A and GT-2A airborne gravimeters; Improvements in design, operation, and processing from 2003 to 2010[C]// Aiborne Gravity 2010 – Abstracts from the ASEG – PESA Airborne Gravity 2010 Workshop, 2010.

- [9] Rodríguez E, Morris C S, Belz J E. A global assessment of the SRTM performance[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2006, 72(3):249-260.
- [10] Tadono T, Ishida H, Oda F, et al. Precise global DEM generation by ALOS PRISM[J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, 2(4):71-76.
- [11] 程鹏飞,文汉江,成英燕,等. 2000 国家大地坐标系椭球参数与 GRS80 和 WGS84 的比较[J]. 测绘学报, 2009, 38(3):189-194.

Cheng P F, Wen H J, Cheng Y Y, et al. Parameters of the CGCS 2000 ellipsoid and comparisons with GRS 80 and WGS 84[J]. Acta Geodaetica et Cartograohica Sinica, 2009, 38(3):189-194.

- [12] 焦文海,魏子卿,马欣,等. 1985 国家高程基准相对于大地水准 面的垂直偏差[J]. 测绘学报,2002,31(3):196-200.
  Jiao W H, Wei Z Q, Ma X, et al. The orgin vertical shift of national height datum 1985 with respect to the geoidal surface [J]. Acta Geodaetica et Cartograohica Sinica,2002,31(3):196-200.
- [13] 郭海荣,焦文海,杨元喜. 1985 国家高程基准与全球似大地水 准面之间的系统差及其分布规律[J]. 测绘学报,2004,33(2): 100-104.

Guo H R, Jiao W H, Yang Y X. The systematic difference and its distribution between the 1985 national height datum and the global quasigeoid[J]. Acta Geodaetica et Cartograohica Sinica, 2004, 33 (2):100-104.

- [14] 赫林,李建成,褚永海. 1985 国家高程基准与全球高程基准之间的垂直偏差[J].测绘学报,2016,45(7):768-774.
  He L, Li J C, Chu Y H. The vertical shift between 1985 national height datum and global vertica datum[J]. Acta Geodaetica et Cartograohica Sinica,2016,45(7):768-774.
- [15] 李建成,褚永海,徐新禹.区域与全球高程基准差异的确定
  [J]. 测绘学报,2017,46(10):64-75.
  Li J C, Chu Y H, Xu X Y. Determination of vertical datum offset between the regional and the global height datum[J]. Acta Geodaetica et Cartograohica Sinica,2017,46(10):64-75.
- [16] 孙中苗,李迎春. 航空重力测量中激光测高数据的处理与应用
  [J]. 测绘通报,2003(11):11-13.
  Sun Z M, Li Y C. Laser altimetric data for airborne gravimetry:processing and application[J]. Bulletion of Surveying and Mapping, 2003(11):11-13.
- [17] Foster M R, Jines W R, Van d W K. Statistical estimation of systematic errors at intersections of lines of aeromagnetic survey data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1970, 75(8): 1507-1511.
- [18] Yarger H L, Robertson R R, Wentlandet R L. Diurnal drift removal from aeromagnetic data using least squares [J]. Geophysics, 1978, 43(6):1148-1156.
- [19] Green A A. A comparison of adjustment procedures for leveling aeromagnetic survey data [J]. Geophysics, 1983, 48 (6): 745 – 753.
- [20] Minty B R S. Simple Micro-leveling for aeromagnetic data[J]. Exploration Geophysics, 1991, 22(4):591-592
- [21] Ferraccioli F, Gambetta M, Bozzo E. Microlevelling procedures ap-

plied to regional aeromagnetic data: An example from the transantarctic mountains (Antarctica) [J]. Geophysical Prospecting, 1998,46(2):177-196.

- [22] Naudy H, Dreyer H. Essai de filtrage non-iineaire applique aux profils aeromagnetiques[J]. Geophysical Prospectiong, 1968(2): 171-178.
- [23] 骆遥,王平,段树岭,等. 航磁垂直梯度调整 ΔT 水平方法研究
   [J]. 地球物理学报,2012,55(11):3854-3861.
   Luo Y, Wang P, Duan S L, et al. Leveling total field aeromagnetic data with measured vertical gradient [J]. Chinese Journal of Geophysics,2012,55(11):3854-3861.
- [24] 于长春,熊盛青,董继国.数字地形模型数据获取方法及精度 分析[J].物探与化探,2001,25(3):198-202.
   Yu C C, Xiong S Q, Dong J G. The technique for acquisition of

DTM data and an analysis of its precision [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25(3):198-202.

- [25] 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. The research on quality evaluation method of test repeat lines in airborne gravity survey[J].
  Chinese Journal of Geophysics,2008,51(5):1538-1543.
- [26] 屈进红,姜作喜,周锡华,等. 航空重力测网交叉点的非遍历逼近方法[J]. 测绘学报,2022,51(1):71-79.
  Qu J H, Jiang Z X, Zhou X H, et al. Non-ergodic approximation method for intersections of airborne gravity survey network[J]. Acta Geodaetica et Cartograohica Sinica,2022,51(1):71-79.
- [27] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0381—2021. 航空重力测 量技术规范[S]. 北京:地质出版社, 2021.

Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0381—2021. Specification for airborne gravity survey [S]. Beijing; Geological Publishing House, 2021.

- [28] Markus T, Neumann T A, Martino A J, et al. The ice, cloud and land elevation satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept and implementation [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190:270-273.
- [29] 夏少波,王成,习晓环,等. ICESat-2 机载试验点云滤波及植被 高度反演[J]. 遥感学报,2014,18(6):1199-1207.
  Xia S B, Wang C, Xi X H, et al. Point cloud filtering and tree height estimation using airborne experiment data of ICESat-2[J]. Journal of Remote Sensing,2014,18(6):1199-1207.
- [30] 王密,韦钰,杨博,等. ICESat-2/ATLAS 全球高程控制点提取 与分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2021,46(2):184-192.

Wang M, Wei Y, Yang B, et al. Extraction and analysis of global elevation control points from ICESat-2/ATLAS data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2):184-192.

- [31] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0004—2015. 重力调查技术规范(1:50000) [S]. 北京:地质出版社,2015.
  Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0004—2015. The technical specification for gravity survey(1:50000)[S]. Beijing:Geological Publishing House,2015.
- [32] 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, methods and application of airborne gravimetry
   [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2004.

## Airborne Bouguer gravity based on synchronous terrains surveyed using helicopter airborne gravimetry

QU Jin-Hong<sup>1,2</sup>, JIANG Zuo-Xi<sup>1,2</sup>, ZHOU Xi-Hua<sup>1,2</sup>, WANG Ming<sup>1,2</sup>, LUO Feng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, MNR, Beijing 100083, China; 2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract**: Large-scale mining activities have been continued in key exploration areas. Consequently, the mined-out areas, waste dumps, and tailings ponds of mines are constantly deforming. As a result, the digital terrain method fails to make the terrain data closely match the airborne gravimetric data, leading to serious correction errors in airborne gravity terrain correction and stone-slab correction. This study calculated the difference between the GNSS geodetic height and the radio terrain clearance altitude of the helicopter gravity and magnetic survey system and then converted the GNSS geodetic height into normal height. Then, the synchronous surveyed terrains were obtained through leveling and fine-scale processing. Moreover, the surveyed terrain data, together with various collected terrain data, were compared with the ICESat-2/ATL08 spaceborne laser elevation. The results show that the surveyed terrains Wxd100 and Wxd400 had elevation precision of 5.33 m and 8.93 m, respectively. After airborne Bouguer gravity correction was conducted using the surveyed terrains, the data quality of the mining area and several typical survey lines was greatly improved. **Key words**: airborne gravimetry; synchronization; surveyed terrain; Bouguer gravity; mine