



武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 基于多源船载重力异常数据的联合再处理——以墨西哥湾为例  
作者: 郭金运, 张鸿飞, 李真, 祝程程, 刘新, 罗洪鑫  
DOI: 10.13203/j.whugis20230088  
收稿日期: 2023-06-04  
网络首发日期: 2023-07-14  
引用格式: 郭金运, 张鸿飞, 李真, 祝程程, 刘新, 罗洪鑫. 基于多源船载重力异常数据的联合再处理——以墨西哥湾为例[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230088>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230088

## 引用格式：

郭金运, 张鸿飞, 李真, 等. 基于多源船载重力异常数据的联合再处理——以墨西哥湾为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230088 (Guo Jinyun, Zhang Hongfei, Li Zhen, et al. Joint Reprocessing of Shipborne Gravity Anomalies based on Multi-Sources: A Case Study of the Gulf of Mexico[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230088)

## 基于多源船载重力异常数据的联合再处理——以墨西哥湾为例

郭金运<sup>1</sup>, 张鸿飞<sup>1</sup>, 李真<sup>1</sup>, 祝程程<sup>2</sup>, 刘新<sup>1</sup>, 罗洪鑫<sup>1</sup>

1. 山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛, 266590

2. 山东建筑大学测绘地理信息学院, 山东 济南, 250101

**摘要:** 船载重力异常数据对于海洋重力场模型的构建起着至关重要的作用。虽然现有的船载重力异常数据在当初获取时已经经过重力测量常规改正、测量环境动态效应改正等处理, 但是船载重力异常数据跨度时间较长, 测量机构、所使用的重力仪与参考基准均不尽相同, 体现出一种多来源的特性; 同时受到当时测量技术与数据处理技术的限制, 获得的数据质量参差不齐, 含有较大的误差, 很难被直接应用。针对此问题, 本文构建了一种多来源船载重力异常数据的联合再处理方法, 分别从粗差剔除、长波误差改正、交叉点平差与系统误差补偿等方面对航线进行精化处理。以墨西哥湾为例, 在美国国家环境信息中心(National Centers for Environmental Information, NCEI) 获取该区域的船载重力异常数据, 首先通过对比参考重力场对粗差航线及剩余航线粗差点进行剔除; 其次基于正常重力公式推导的二次多项式模型对测线长波误差进行改正; 最后基于交叉点不符值, 通过交叉点条件平差与构建混合多项式模型相结合的方法对航线观测值进行误差推估与系统误差补偿。经过一系列联合处理方法之后, 船载重力异常交叉点不符值的均方根(RMS)由原始数据的 12.1mGal 减少至 3.7mGal, 与重力异常模型 SIO V32.1 的残差 RMS 由精化前的 6.62mGal 减少至 3.91mGal。最后对两组航线数据与模型的差值做频率域分析, 结果表明误差的功率谱密度在各频率域上都得到明显减弱。以上结果均表明经过本文联合处理方法之后, 船载数据质量得到了明显改善, 该方法可用于进一步优化全球船载重力异常数据, 从而为高精度的海洋重力场模型构建提供可靠数据集。

**关键词:** 船载重力测量; 重力异常; 墨西哥湾; 数据再处理; 长波误差改正; 交叉点平差; 功率谱密度

## Joint Reprocessing of Shipborne Gravity Anomalies Based on Multi-Sources: A Case Study of the Gulf of Mexico

Guo Jinyun<sup>1</sup>, Zhang Hongfei<sup>1</sup>, Li Zhen<sup>1</sup>, Zhu Chengcheng<sup>2</sup>, Liu Xin<sup>1</sup>, Luo Hongxin<sup>1</sup>

1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. School of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

**Abstract: Objectives:** Shipborne gravity anomaly data plays a crucial role in the construction of marine gravity field models. Although the existing shipborne gravity anomaly data have undergone conventional gravity

**第一作者:** 郭金运, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空间大地测量、物理大地测量、海洋大地测量等方面的研究。邮箱: jinyunguo1@126.com

**通信作者:** 李真, 男, 博士。邮箱: lizsk1994@163.com

**基金项目:** 国家自然科学基金(42274006,41774001), 山东科技大学科研创新团队支持计划(2014TDJH101)

measurement corrections and dynamic environmental effect corrections at the time of acquisition, the data span a long time period, involve multiple measurement agencies, gravity instruments, and reference frames, and thus exhibit a multi-source characteristic. Furthermore, due to the limitations of measurement and data processing techniques at the time of acquisition, the quality of the data varies and contains significant errors, making direct application difficult. **Methods:** In this study, a joint reprocessing method for multi-source shipborne gravity anomaly data is proposed, which refines the ship tracks through outlier elimination, long-wavelength error correction, intersection point adjustment, and systematic error compensation. First, rough tracks and remaining rough points were eliminated by comparing them with the reference gravity field; second, a quadratic polynomial model derived from the normal gravity formula was used to correct the long-wavelength error of the survey lines; finally, the error estimation and systematic error compensation of the observed values were performed through intersection point condition adjustment and the construction of a mixed polynomial model. **Results:** Taking the Gulf of Mexico as an example, shipborne gravity anomaly data in this region were obtained from the National Centers for Environmental Information (NCEI). After a series of joint processing methods, the root mean square (RMS) of crossover differences is reduced from 12.1mGal to 3.7mGal, and the residual RMS of gravity anomaly model SIO V32.1 is reduced from 6.62mGal before refinement to 3.91mGal. The difference between the two sets of ship tracks and the model was analyzed in the frequency domain, and the power spectral density of the error was significantly reduced in all frequency domains. **Conclusions:** As this study combined shipborne gravity data from different periods for joint processing, the final processing results have a certain gap compared to the precision of modern high-precision shipborne gravity measurements. However, overall, the accuracy of shipborne data has been significantly improved, which greatly enhances the utilization rate of shipborne data. This method can be used to further optimize global shipborne gravity anomaly data, providing a reliable dataset for constructing high-precision ocean gravity field models.

**Key words:** Shipborne gravimetry; Gravity anomaly; Gulf of Mexico; Data reprocessing; Long-wave error correction; Crossover adjustment; Power spectrum density

重力异常在地球物理学和大地测量学中有着非常重要的应用<sup>[1-2]</sup>。海洋重力数据被认为是海洋探索<sup>[3]</sup>、海底地形研究与地质构造研究<sup>[4-5]</sup>、船载勘测计划<sup>[6]</sup>、石油勘探和惯性导航<sup>[7]</sup>、空间参考确定等极其重要的数据。船载重力测量在测量精度、测量分辨率、获取重力场高频信息的能力等方面都具有较大的优势<sup>[8-12]</sup>，因此，相对于其他测量手段，船载重力测量一直是获取高精度、高分辨率海洋重力异常数据的重要技术手段。

目前可获得的船载重力异常数据当中，一些上世纪九十年代以前的航线由于受到当时测量条件与测量技术的限制，航线数据中会存在明显的系统误差。船载重力测量起源较早，早在 1923 年 Vening-Meinesz 就利用摆仪进行海洋重力测量的尝试<sup>[13]</sup>，因此现有的船载重力异常数据有相当一部分都是上世纪 90 年代之前所测得的，而在这个阶段，无论是重力仪的测量精度、导航定位的精度还是船载数据的各项处理技术都处于一个较低的水平<sup>[14-16]</sup>。以上因素的限制，加上海洋动态效应的影响，都会使最终测量结果存在较大的粗差与系统误差。同时这些数据的测量机构、所使用的重力仪与参考基准均不尽相同，导致数据质量的参差不齐，很难在实践中被直接应用。为了解决以上问题，我们急需对现有的多来源船载重力异常数据

进行再次精化处理，使更多的船载重力异常数据可以被有效利用。

一般来讲，影响船载重力异常测量成果精度的因素主要有重力仪测量精度、导航定位精度、测量动态效应改正技术、误差分析处理与补偿技术<sup>[17-19]</sup>。对于现有的多来源船载重力异常历史数据，受到当时测量条件的限制，仪器测量误差与定位误差会不可避免地融入到船载重力异常历史观测数据当中，只能依靠后期的数据处理技术尽可能地削弱其影响。LaCoste 和 Eötvös 分别提出了交叉耦合效应（Cross-Coupling, CC）改正公式和厄特弗斯改正公式来对交叉耦合效应和厄特弗斯效应进行改正<sup>[13,20-21]</sup>，有效减弱了动态效应的影响。目前看来，要进一步对历史船载重力异常有效再处理以提升精度，主要还是通过数据后处理技术也就是误差分析处理与补偿技术来实现。

船载重力数据再处理主要包括粗差探测剔除、系统误差提取与补偿，近年来多位学者在该领域进行了大量的研究。邓凯亮等人基于窗口移动中误差模型探测船载重力数据的粗差，并将剔除粗差后的船载重力数据与 DTU10GRA 模型进行比较，两者之间的差值最大值、最小值、均方差分别达到 36.79mGal、36.53mGal、6.23mGal<sup>[22]</sup>。Van Hees 提出了应用最小二乘配置法进行交叉点平差<sup>[15]</sup>；Prince 等提出将测线航迹分为若干个直线段，并通过测线交叉点平差的方法计算各个线段的系统差改正数，最终实验区域内 204 个交叉点的不符值均方根由原始的 11.4mGal 减少为 7.8mGal<sup>[16]</sup>；黄谟涛等人从物理场角度出发，在提出测线网自检校平差方法的基础之上，又提出了海洋重力测线网自检校平差两步处理法，实现了在平差中和平差后对系统误差分步补偿，最终实验区域内 462 个交叉点的不符值均方根由 1.65mGal 减少为 0.61mGal<sup>[23-24]</sup>。以上这些文献只是针对特定航线或较短时期内获得的航线进行研究，并没有着重强调长时间跨度、不同精度航线的处理；同时它们只是单方面地侧重于粗差剔除或系统误差改正等方面的研究，并没有形成一种针对长时间跨度、不同基准下多源船载重力数据的联合处理方法。

墨西哥湾是地球上油气最为富集的油气勘探区<sup>[25]</sup>，获取该区域高精度的重力异常数据具有非常重要的意义，因此本文选取墨西哥湾海域的多源船载重力异常历史数据进行再处理。首先对观测值粗差进行剔除，包括整条航线剔除与部分粗差点剔除；其次从正常重力公式出发构造二次多项式改正公式实现参考基准的统一与长波误差改正；最后为了解决剩余误差所引起的交叉点不符问题，使用条件平差与混合多项式模型相结合的方法对系统误差进一步改正。

# 1 数据与方法

本文选取墨西哥湾为研究区域 (80°W~100°W, 15°N~32°N), 该区域内蕴藏着大量的石油和天然气, 准确获得墨西哥湾海域的重力异常对开展墨西哥湾断裂与洋壳分布以及油气勘探引起的地质变化的研究具有重要意义<sup>[3]</sup>。

## 1.1 研究数据

### 1.1.1 船载重力异常数据

研究区域内的船载重力异常数据是在美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的下属机构美国国家环境信息中心 (National Centers for Environmental Information, NCEI) 所下载的 (下载地址: <http://www.ncei.noaa.gov/maps/geophysics>), 区域内总共获取了 1961 年~1995 年的 34 条航线, 共有 264188 个测点, 这些航线年代跨度不均, 且在研究区域内相互交织、呈无规则不均匀分布, 同时这些航线数据为不同的测量机构所获取, 航线具体信息见表 1, 航线的空间分布情况见图 1。

表 1 墨西哥湾船载重力异常航线信息

Tab.1 Routes Information of Shipborne Gravity Anomaly in the Gulf of Mexico

观测机构	航线名	观测国家	观测平台	观测仪器	观测年份
Woods Hole Oceanographic Institution	ch055101	USA	Chain		1965
	ch100112	USA	Chain		1971
Lamont-Doherty Earth Observatory	ew9417	USA	Maurice Ewing	BellAerospace BGM-3	1994
	ew9501	USA	Maurice Ewing	BellAerospace BGM-3	1995
US Navy Naval Oceanographic Office	kea01-69	USA	Keathley		1968
	kea06-70	USA	Keathley		1970
	kea08-70	USA	Keathley		1970
	kea09-68	USA	Keathley		1968
	kea09-69	USA	Keathley		1969
	kea09-70	USA	Keathley		1970
	kea10-68	USA	Keathley		1968
	kea10-70	USA	Keathley		1970
	kea11-68	USA	Keathley		1968
Univ. of Hawaii, HIG/Univ. Texas Austin	mw8909	USA	Moana Wave	LaCoste & Romberg S-33	1989
USGS Branch of Pacific Marine Geology	p183gm	USA	J. W. Powel		1983
	u171gm	USA	United Geo I		1971
	u871pr	USA	United Geo I		1971
Lamont-Doherty Geological Observatory	rc0901	USA	Robert D. Conrad	ASKANIA GSS2-6	1964
	rc0902	USA	Robert D. Conrad	ASKANIA GSS2-6	1964
	rc1003	USA	Robert D. Conrad	ASKANIA GSS2-6	1965



	rc1012	USA	Robert D. Conrad	ASKANIA GSS2-6	1966
	rc1201	USA	Robert D. Conrad	ASKANIA GSS2-6	1968
	rc2302	USA	Robert D. Conrad	ASKANIA GSS2-6	1982
	v1704	USA	Vema	Graft-Askania GSS2-12	1961
	v1817	USA	Vema	Graft-Askania GSS2-12	1962
	v2103	USA	Vema	Graft-Askania GSS2-12	1965
	v2401	USA	Vema	Graft-Askania GSS2-12	1967
	v2402	USA	Vema	Graft-Askania GSS2-12	1967
	v2413	USA	Vema	Graft-Askania GSS2-12	1967
	v2501	USA	Vema	Graft-Askania GSS2-12	1968
	v2608	USA	Vema	Graft-Askania GSS2-12	1969
Oregon State Univ., CONMAR Study Group	yucat1-3	USA	Altair	LaCoste & Romberg S42	1985
	yucat-l4	USA	Altair	LaCoste & Romberg S42	1985
	yucat-tr	USA	Altair	LaCoste & Romberg S42	1985

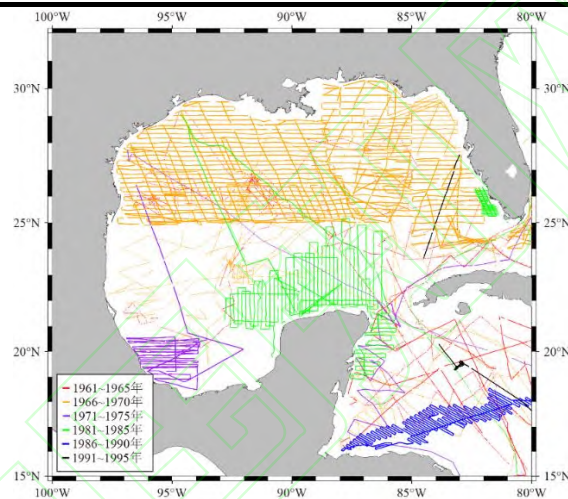


图 1 墨西哥湾海域船载重力异常航线分布情况

Fig.1 Routes Distribution of Shipborne Gravity Anomaly in the Gulf of Mexico

由表 1 和图 1 可以看出, 这些航线的测量时间跨度由上世纪 60 年代到 90 年代, 时间跨度较长, 这也导致这些测量数据是由不同的测量机构采用不同的测量平台、测量仪器与重力基准所获得的, 同时受到当时各种测量技术的限制与海洋重力测量本身固有的动态效应的影响, 这些数据质量参差不齐, 含有较大的长波误差与系统误差, 在实际应用中难以达到相应的精度需求。

### 1.1.2 重力场模型

XGM2019e\_2159 参考重力模型是从 ICGEM (International Center for Global Earth Models) 网站上 (下载地址: <http://icgem.gfz-potsdam.de/calgrid>) 下载的 1'×1' 的格网数据。XGM2019e 是一个组合的地球重力场模型, 主要由三种数据源构成: GOCO06s 重力场模型、NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) 编制的地面重力格网数据以及由海洋测高和大陆地形得出的重力异常组成的补充数据集<sup>[26]</sup>。该模型由球谐函数表示, 其球谐系数阶次最高可

展开至 5399 阶，一般认为，XGM2019e 模型在海洋上的性能更佳，并且独立于现有的高分辨率重力场模型<sup>[27]</sup>。由于该模型既具有通过卫星获得的长波长信息，又具有通过海洋和地面数据获取的短波长信息，所以它更加接近于实际海洋重力信息，本文用其作为基准统一与长波误差改正的背景场。

SIO V32.1 模型是由美国加利福尼亚大学圣迭戈分校 Scripps 海洋学研究所 (Scripps Institution of Oceanography, SIO) 发布的海洋重力数据模型 (下载地址: <https://topex.ucsd.edu/>)。该模型构建时对 Jason-1/2、Envisat、Altika 和 Cryosat-LRM 等波形测高数据进行波形重定，同时还加入了额外 12 个月的 Altika、Cryosat-LRM、Cryosat SAR 和 Sentinel-3A/B 的卫星测高数据。SIO V32.1 是目前为止 SIO 最新发布重力异常模型，由于其数据源为纯卫星数据，所以认为该重力异常模型与船载重力异常是相互独立的，因此为了检验精化前后船载重力异常数据的精度变化，选取该模型进行评估。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 船载重力异常数据粗差探测与剔除

由于人为原因、仪器原因、海洋动态效应的影响，船载重力仪在测量时不可避免会出现较大的粗差。目前发布的卫星测高重力模型在精准度和可靠性方面都已经达到了较高的水平<sup>[28]</sup>，SIO V32.1 作为 SIO 发布的最新重力异常模型，其在墨西哥湾海域与船载重力异常的比对精度达到 3.56mGal。因此这里将 SIO V32.1 重力异常模型作为参考模型进行船载重力异常的粗差探测。粗差探测主要分为整条航线粗差探测与部分测点粗差探测。

对于整体观测值粗差较为明显的航线需要提前剔除。首先获得航线各测点上重力异常观测值与 SIO V32.1 重力异常模型值的差值，并计算这些差值的标准差 (STD)，记为  $\sigma_i (i = 1, 2, \dots, k)$ ， $k$  为区域内航线的个数，再计算区域内所有航线重力异常观测值与 SIO V32.1 重力异常模型差值的 STD，记为  $\sigma_{\text{总}}$ ，对于  $\sigma_i$  大于  $3\sigma_{\text{总}}$  的航线进行剔除；之后对剩余的航线采用相同的方法进行迭代处理，直到每条航线的  $\sigma_i$  均小于  $3\sigma_{\text{总}}$ 。对于剩余的航线，也不可避免会存在一些粗差值，尤其是在航线拐角处，受到船体本身加速度变化的影响，更容易出现较大的粗差观测值，这些粗差值可被分为大粗差和小粗差，并分别采用不同的方法进行剔除<sup>[29]</sup>。对于大粗差可采用阈值排除法进行剔除，在研究区域内借助重力异常模型 SIO V32.1 预先设定一个阈值，当船载重力测量的某个重力异常观测量超出所设定的阈值时，就认为该观测值为大粗差值。在剔除完大粗差的基础之上，对于小粗差，可采用现代稳健估计方法进行筛选，具体是将船载重力测量观测值与 SIO V32.1 模型计算值的互差作为新的观测值序

列，将每一个测点作为检测点，利用检测点周围的新观测值，通过抗差 M 估计的选权迭代方法对每个检测点进行推估计算，最后将检测点处的推估计算值与该点的实际新观测值进行比较，根据两者之间差值的大小来判断该检测点是否为小粗差点。

### 1.2.2 长波误差二次项改正

由于不同航线船载重力异常数据的观测机构、观测时间、观测设备以及参考基准存在不一致，实际船载重力异常数据中存在较大的长波误差<sup>[30]</sup>，考虑到航线测量年代参差不齐且有的航线年代比较久远，航线测量时所采用的重力基准不可追溯，无法对各条航线基于各自的重力基准进行改正，因此这里统一采用 XGM2019e\_2159 重力异常模型为矫正基准。同时本文采用正常重力公式前两阶的形式来表示船载重力数据与 XGM2019e\_2159 重力异常模型参考基准不统一引起的误差。一般情况下正常重力公式<sup>[31]</sup>的前两阶可表示为：

$$\gamma_0 = d_0 + d_1 \sin^2 \varphi \quad (1)$$

其中  $d_0$  和  $d_1$  是参数， $\varphi$  是船载数据的纬度。 $\sin^2 \varphi$  可表示为航线沿子午线方向的恒定速度  $V_N$  与测点距起始测点时间间隔  $\Delta t$  的函数，将  $\sin^2 \varphi$  利用麦克劳林公式展开至二次项，并且将稳定平台不水平引起的误差以及各航次间的重力基准不同、船载重力仪零漂等引起的误差用一个偏移常量来进行改正<sup>[32]</sup>，令船载重力数据与 XGM2019e\_2159 重力异常模型参考基准不统一引起的误差为  $\Delta dg_i$ ，并用  $\Delta dg_i$  代替  $\gamma_0$ ，最终的二次多项式改正模型如下：

$$\Delta dg_i = \alpha_i + \beta_i \Delta t_i + \gamma_i \Delta t_i^2 \quad (2)$$

其中  $i$  是船载重力航线编号， $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  和  $\gamma_i$  是改正参数， $\Delta t_i$  为测线上观测点时刻和航线出发时刻的时间间隔， $\Delta dg_i$  为参考重力场在航线观测点处的重力异常值与船载实测重力异常的差值。

对区域内的每一条航线都构造如式 (2) 的二次项改正模型，并利用最小二乘方法计算改正参数  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  和  $\gamma_i$ 。获得参数后，便可以由已知的  $\Delta t$  计算各个测点处的改正值。

### 1.2.3 交叉点条件平差

由于定位误差的影响，即使进行了长波误差改正，航线之间仍存在交叉点不符值，本文采用测线网交叉点条件平差的方式来求取各交叉点处的改正值<sup>[33]</sup>。

#### 1.2.3.1 交叉点信息获取

交叉点平差的第一步就是获取交叉点不符值等其他交叉点信息，本研究采用 GMT (Generic Mapping Tools) 软件中的 x2sys 模块来实现交叉点信息的提取<sup>[34-35]</sup>。



对所有交叉点处两条航线上的观测值进行求差,可以获得每个交叉点处的交叉点不符值。交叉点不符值将作为交叉点条件平差的观测值,需要在平差前利用  $3\sigma$  准则筛选出粗差不符值,使这些不符值不作为交叉点条件平差的观测值。

### 1.2.3.2 交叉点条件平差

对于任一个交叉点,其对应的两条航线分别称之为航线 1 和航线 2,这两条航线在交叉点处可分别列出如下方程:

$$g_{12} = g_{0_{12}} + v_{12} \quad (3)$$

$$g_{21} = g_{0_{21}} + v_{21} \quad (4)$$

其中  $g_{12}$  为航线 1 在该点处的观测值,  $v_{12}$  为其改正值;  $g_{21}$  为航线 2 在该点处的观测值,  $v_{21}$  为其改正值;  $g_{0_{12}}$  和  $g_{0_{21}}$  为该点处重力异常值的真实值,且有  $g_{0_{12}} = g_{0_{21}}$ 。联系上面的两个方程,可建立如下形式的条件方程:

$$v_{12} - v_{21} = g_{12} - g_{21} \quad (5)$$

式中,令  $d_{12} = g_{12} - g_{21}$ ,则  $d_{12}$  即为航线 1 和航线 2 在该交叉点处的交叉点不符值。对于一个测区,其内部的多条航线构成多个交叉点,对于每一个交叉点,都可以构成一个如式(5)的条件方程,将所有的方程构成一个方程组便可以得到交叉点条件方程的矩阵形式:

$$\mathbf{AV} - \mathbf{W} = \mathbf{0} \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{A}$  为由 1 和-1 组成的系数矩阵,  $\mathbf{V}$  为改正数向量,  $\mathbf{W}$  为交叉点不符值向量。

由条件平差最小二乘原理可知式(6)的最小二乘解为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}^T)^{-1}\mathbf{W} \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{P}$  为观测向量权矩阵。假设测线上的测点都是独立观测,则可以得到:

$$v_{12} = p_{21}d_{12}/(p_{12} + p_{21}) \quad (8)$$

$$v_{21} = -p_{12}d_{12}/(p_{12} + p_{21}) \quad (9)$$

式中,  $p_{12}$  和  $v_{12}$  分别代表航线 1 在交叉点处的观测权因子和观测量改正数;  $p_{21}$  和  $v_{21}$  分别代表航线 2 在交叉点处的观测权因子和观测量改正数。  $p_{12}$  和  $p_{21}$  的计算公式如下:

$$p_{12} = 1/\sigma_1^2; \quad p_{21} = 1/\sigma_2^2 \quad (10)$$

其中  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  为航线 1 和航线 2 的标准差,其计算公式如下:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} (l_k - m_k)^2} \quad (i=1, 2) \quad (11)$$

式中  $N_i$  ( $i=1, 2$ ) 为航线上观测点的个数;  $l_k$  和  $m_k$  分别为航线各测点对应的重力异常观测值及其对应的重力异常模型值。

#### 1.2.4 系统误差模型构建

通过交叉点条件平差所求的改正数  $v$ , 可看作是航线在观测时所产生的虚拟观测量, 其中既包含剩余的系统误差, 也包含偶然误差。要进一步对改正数  $v$  中的系统误差进行补偿、削弱交叉点不符值, 就需要通过构建误差模型将系统误差表示出来<sup>[36]</sup>。

##### 1.2.4.1 误差模型的构建

交叉点不符值产生的原因受到多方面系统误差综合效果的影响, 有很多是由于线性变化与周期变化两者相结合而产生的复杂变化的影响, 对于这些变化比较复杂的系统误差, 通常可利用误差函数模型的形式来描述。这里采用以测点时间作为自变量的混合多项式模型来描述系统偏差的变化, 该模型的优点是只需要单独地处理一条航线在交叉点处的虚拟观测量, 计算过程较为简单, 法方程系数矩阵也不会出现秩亏现象<sup>[37]</sup>。该模型如下:

$$f(t) = a_0 + a_1(t - t_0) + \sum_{i=1}^m (C_i \cos i\omega(t - t_0) + S_i \sin i\omega(t - t_0)) \quad (12)$$

式中,  $t$  代表航线上各测点时刻,  $t_0$  是航线在该区域内起始测点的时刻;  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $C_i$  和  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 均为待定系数;  $\omega$  表示对应的误差变化周期的角频率, 其计算式为:

$$\omega = 2\pi / (t_1 - t_0) \quad (13)$$

式中:  $t_0$  和  $t_1$  分别代表一条航线在该区域内起始观测时刻和结束观测时刻。

$m$  是一个自然数, 其数值由航线上的交叉点数来决定。根据经验,  $m$  的取值与航线上交叉点个数的对应关系如表 2。

表 2 航线交叉点数与  $m$  取值对应关系

Tab. 2 The Number of Ship Route Crossover Points Corresponds to the Value of  $m$

航线交叉点个数	模型形式	$m$ 取值	模型参数个数
1 个交叉点	平均分配交叉点不符值	$m=0$	0
2~3 个交叉点	只选用误差模型线性部分	$m=0$	2
4~5 个交叉点	线性方程与一级傅里叶级数结合	$m=1$	4
6~8 个交叉点	线性方程与二级傅里叶级数结合	$m=2$	6

#### 1.2.4.2 误差模型参数解算

对于每一条测线，将交叉点平差后的交叉点改正数  $v$  作为虚拟观测量，利用式 (12) 构建的误差模型进行参数解算。在一条航线的每一个交叉点处可建立以交叉点改正数  $v$  为观测值的误差方程式：

$$v = f(t) + \delta \quad (14)$$

式中， $\delta$  为偶然误差，将所有交叉点处的上述方程式构成方程组，便可得到其矩阵形式：

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{U} \quad (15)$$

式中  $\mathbf{V}$  是由交叉点条件平差得到的交叉点改正值所构成的虚拟观测值向量（即交叉点处重力异常改正数向量）； $\mathbf{B}$  为航线上交叉点观测时刻与航线起始时刻的时间差构成的已知系数矩阵； $\mathbf{X}$  为待求误差模型参数向量； $\mathbf{U}$  为  $\mathbf{V}$  的改正数向量。

则式 (15) 的最小二乘间接平差解为：

$$\mathbf{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{V} \quad (16)$$

将式 (16) 求得的模型参数带入式 (12) 中，依据航线上各个测点的观测时间可以完成系统偏差改正。

多源船载重力异常数据联合精化处理方法的总体实现过程见图 2。

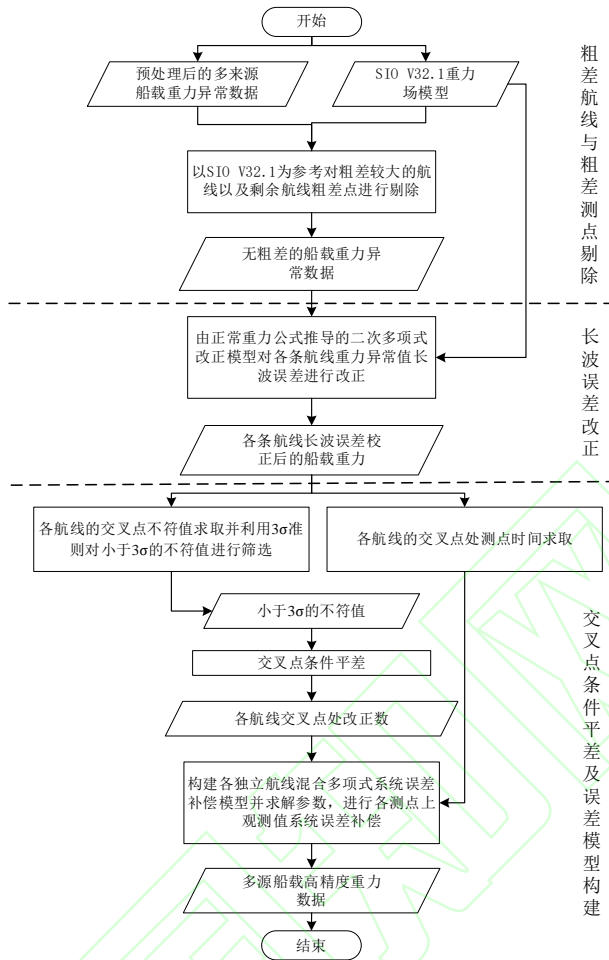


图 2 船载重力异常数据联合平差处理实现过程

Fig.2 Flowchart of Combined Adjustment Processing Used for Shipborne Gravity Anomaly Data

## 2 结果与分析

### 2.1 船载重力异常数据粗差剔除

在墨西哥湾海域内一共收集到 34 条船载重力异常航线数据,其时空分布情况可见图 1,由图可知该区域内的大部分航线的观测时间都在 1990 年之前,由于受到当时导航精度与测量仪器精度的制约,这些航线中难免会出现整体观测精度较差的航线,采用 SIO V32.1 模型为比对基准和 1.2.1 中粗差航线剔除方法对这部分航线进行剔除,结果有 3 条航线被剔除,统计结果如表 3 所示。这三条航线观测时间都集中在上世纪 60 年代初期,差值 STD 最大可达 28.88mGal,对于这些航线,在进行船载重力异常数据精化处理之前,应当予以剔除。

表 3 剔除航线信息

Tab. 3 Information of Eliminating Routes

航线名	观测国家	观测机构	观测时间	航线测点数	航线与 SIO V32.1 模型差值 STD (mGal)
ch055101	USA	美国地质勘探局太平	19651118-	2681	23.36

		洋海洋地质学分部	19651207		
v1817	USA	拉蒙特-多尔蒂地质观 测站	19621030- 19621103	760	28.88
v2103	USA	拉蒙特-多尔蒂地质观 测站	19650228- 19650310	680	16.56

船载重力仪在观测时还会受到海上风、流、压及海水运动、海浪起伏、近地空间大气湍流等各类动态环境影响，墨西哥湾是一个小型的环陆型海域，测量过程中改变航线航速的频率较高，这些因素都会使得在剩余的航线中仍然会存在一定量的粗差观测值，同样以 SIO V32.1 模型作为比对基准采用 1.2.1 中的大粗差、小粗差剔除方法对航线中隐藏的粗差点进行剔除。

分别对原始航线的交叉点不符值、粗差航线剔除的后交叉点不符值以及大小粗差剔除后的交叉点不符值进行统计，结果见表 4。可以看到两次粗差剔除后测线的交叉点重力不符值均方根均有明显的减少，这也证明了本文粗差剔除方法的有效性。

表 4 两次粗差剔除前后交叉点不符值统计 (mGal)  
Tab. 4 Statistics of Crossover Differences Before and After  
Twice Gross Error Eliminations(mGal)

	Max	Min	Mean	STD	RMS
原始航线	78.25	-60.28	1.47	12.01	12.10
粗差航线剔除后	78.25	-43.27	1.44	8.28	8.41
大小粗差剔除后	36.21	-23.02	1.41	6.40	6.56

## 2.2 长波误差改正

不同航线船载重力异常数据的观测机构、观测时间、观测设备以及参考基准存在不一致，会使得重力观测数据纯在长波误差，利用 1.2.2 中由正常重力公式推导得到的式 (2) 对船载数据观测值进行改正，对于改正前后的 NCEI 船载重力异常数据，分别对区域内交叉点处重力异常不符值进行统计分析，其结果见表 5，由表中数据可知，经二次项改正模型改正后的船载数据在精度上得到了较好的改善，不符值均方根由改正前的 6.56mGal 减少到 4.77mGal。这也说明该方法可以有效对观测数据中的长波误差进行改正。

表 5 长波误差改正前后航线交叉点处重力异常不符值统计(mGal)  
Tab. 5 Statistics of Gravity Anomaly Differences at Crossover Points  
Before and After Long-wave Error Correction (mGal)

	Max	Min	Mean	STD	RMS
二次项改正前	36.21	-23.02	1.41	6.40	6.56



### 2.3 交叉点平差与系统误差补偿

为了进一步对船载重力异常数据的系统误差进行补偿与改正,接着利用交叉点条件平差与系统误差模型拟合相结合的方式对系统误差进一步改正。首先按照 1.2.3.1 中方法,利用 GMT 在实验区域内获取所有交叉点的位置与交叉点不符值,最终在实验区域内共有 26 条航线获取了交叉点,交叉点总数为 1556 个。交叉点不符值受到观测值的影响会存在粗差,在交叉点平差之前要对其利用  $3\sigma$  准则进行剔除,使其不作为接下来交叉点条件平差的观测值。最终交叉点不符值个数由原来的 1556 个减少至 1540 个,剔除率为 0.01%。

基于区域内获得的交叉点不符值,利用 1.2.3.2 中交叉点条件平差方法获取各条航线在交叉点处的交叉点改正数  $v$ 。将各条航线上面的改正值  $v$  当作虚拟观测值,根据 1.2.4 所构建的误差模型,在各个交叉点观测时间已知的情况下,便可完成每一条航线误差模型参数的解算。

为了将航线上交叉点处系统误差拟合值与实际交叉点改正数  $v$  (虚拟观测值)进行对比,这里选取了两条航线: ch100112、rc0902,分别绘制这两条航线的实际交叉点改正值曲线、拟合交叉点改正值曲线以及拟合偏差曲线,其拟合情况见图 3、图 4。由图 3 (a)、图 4 (a) 可以看到,红色线即为构建的系统误差改正模型曲线,其主要表示从交叉点改正值中提取的系统误差改正值,蓝色线为各个交叉点上的实际改正值,拟合的系统误差值在总体趋势上与改正数  $v$  的趋势相一致,对改正数  $v$  中的系统误差有一定的补偿,但还是有一部分系统误差蕴藏在观测值中,如图 3 (b)、图 4 (b) 的绿色曲线所示,该曲线是由实际交叉点改正值减去交叉点处拟合的系统误差值所得。分别对两条航线的拟合偏差值进行统计分析,见表 6。

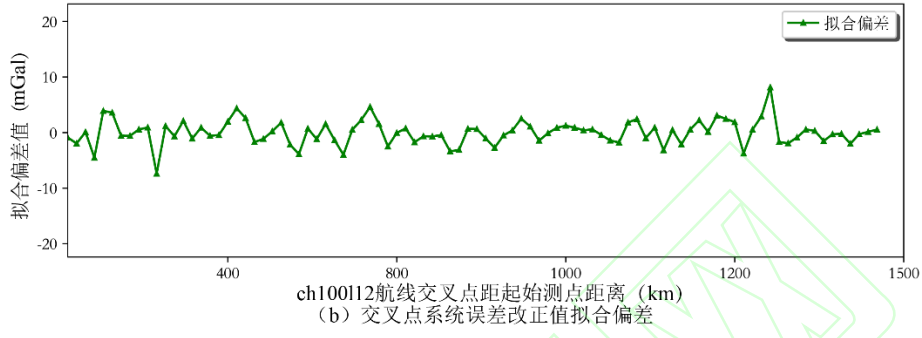
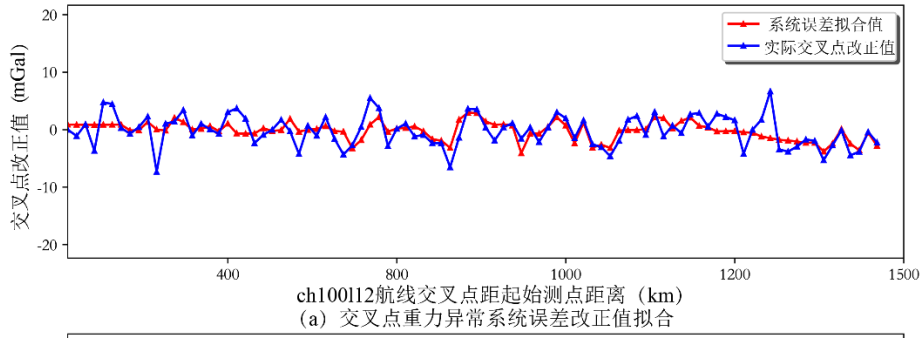


图 3 ch100112 航线误差模型拟合

Fig.3 Error Model Fitting of Route ch100112

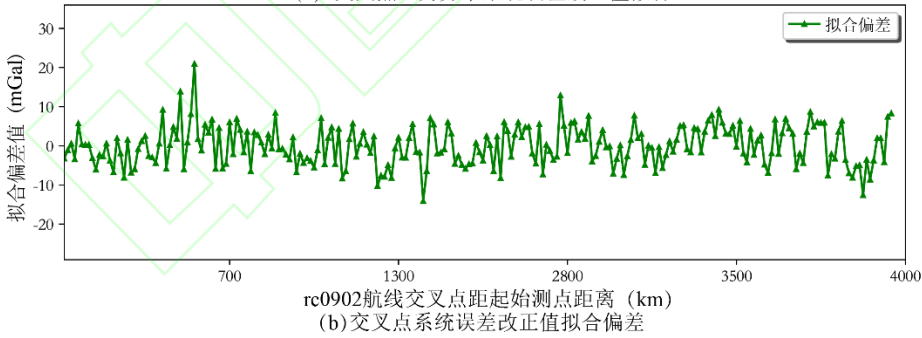
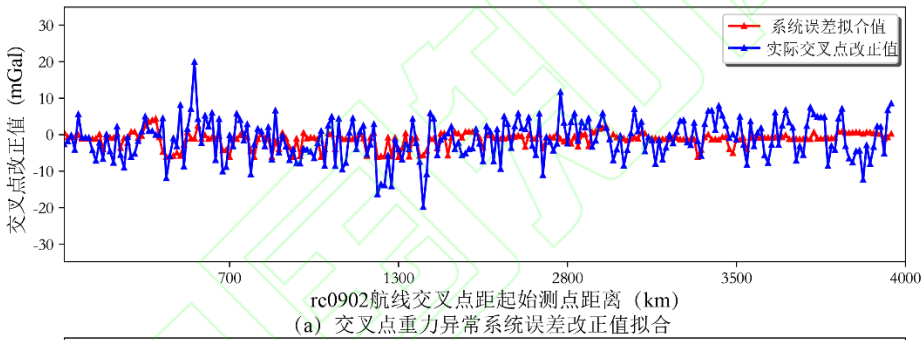


图 4 rc0902 航线误差模型拟合

Fig.4 Error Model Fitting of Route rc0902

表 6 船测重力系统误差校正模型与交叉点处改正值差异的统计结果 (以两条航线为例) (mGal)  
 Tab.6 Statistical Results of Difference Between System Error Correction Model of Shipborne Gravity and Corrections at Crossover Points (Taking Two Routes as Examples) (mGal)

航线编号	Max	Min	Mean	STD	RMS
ch100112	8.14	-7.37	0	2.19	2.19
rc0902	20.90	-14.10	0	4.90	4.90

将最小二乘迭代拟合出来的参数带入式(12)的误差模型中,依据各个测点的观测时间计算各个测点的系统误差改正值,利用系统误差改正值对每个测点的实际观测值进行误差补偿。对于改正后的船载重力异常数据,再次对交叉点不符值进行统计并与改正前进行对比,其结果见表7。由表7可以看出,进行误差补偿之后,交叉点不符值的STD和RMS分别由原来的4.76mGal、4.77mGal减少为3.70mGal、3.70mGal,整体上精度又提高了1mGal左右。这样的结果也验证了使用交叉点平差与误差模型推估相结合的方法确实可以有效地对测线网进行平差,提升测线网的精度。

表7 系统误差补偿前后交叉点不符值统计(mGal)

Tab.7 The Statistics of Crossover Differences Before and After System Error Compensation (mGal)

	Max	Min	Mean	STD	RMS
系统误差补偿前	23.06	-17.83	-0.23	4.76	4.77
系统误差补偿后	19.85	-16.47	-0.10	3.70	3.70

## 2.4 整体再处理结果及精度分析

### 2.4.1 船载重力异常整体再处理结果与精度检验

表7展示了船载数据再处理前后交叉点不符值的统计结果,它反映的仅是数据内部的一致性,为了更好地反映出数据外部准确性的信息,需要对整体再处理前后的船载数据进行外符合精度检验<sup>[38]</sup>。这里选取SIO V32.1模型作为参考,首先利用三次样条插值法将SIO V32.1模型分别插值到再处理前后的船载数据点上,然后利用模型值减去处理前后船载数据观测值得到残差,分别对处理前后的残差集合进行统计分析,结果见表8,可以看到经过本文方法联合再处理后的船载重力异常在精度上明显优于处理前的原始重力异常数据。为了更加直观地展示重力异常数据整体处理的结果,这里给出处理前后船载重力异常数据在实验区域的空间分布图,如图5(a)和图5(b),同时获得处理前后重力异常的差值分布图与差值直方图,如图6(a)和图6(b)。由图6(a)可知,航线误差改正较大的地方主要分布在墨西哥湾南岸与北岸等靠近岸边的浅水海域,同时在加勒比海南岸附近的一组航线也有明显的误差改正,这主要是由于该海域存在较多的岛屿以及航线存在较多拐点所导致的。由图6(b)可以看出系统误差改正值大小的分布情况,-3mGal到3mGal之间的改正值占总改正值的80.3%,-5mGal到5mGal之间的改正值在总改正值的占比可达90.8%。

表8 SIO V 32.1模型与处理前后船载数据残差统计(mGal)

Tab. 8 Statistics of Residual Between SIO V 32.1 Model and Shipborne Data Before and After Reprocessing(mGal)

	Max	Min	Mean	STD	RMS
模型与原始船载重力异常残差	180.81	-90.16	0.49	6.62	6.70
模型与处理后船载重力异常残差	55.42	-37.13	-0.02	3.91	3.91

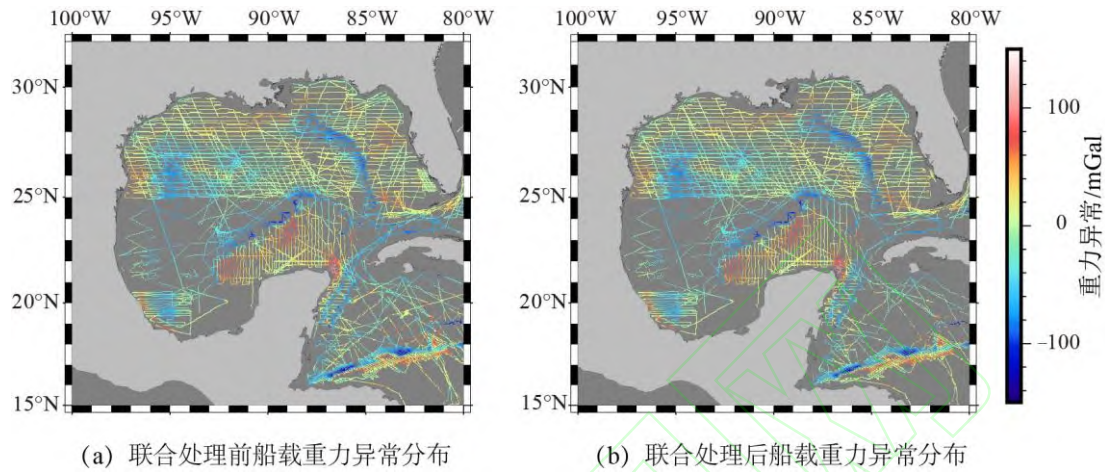


图 5 联合处理前后船载重力异常分布

Fig. 5 Distribution of Shipborne Gravity Anomaly Before and After Joint Processing

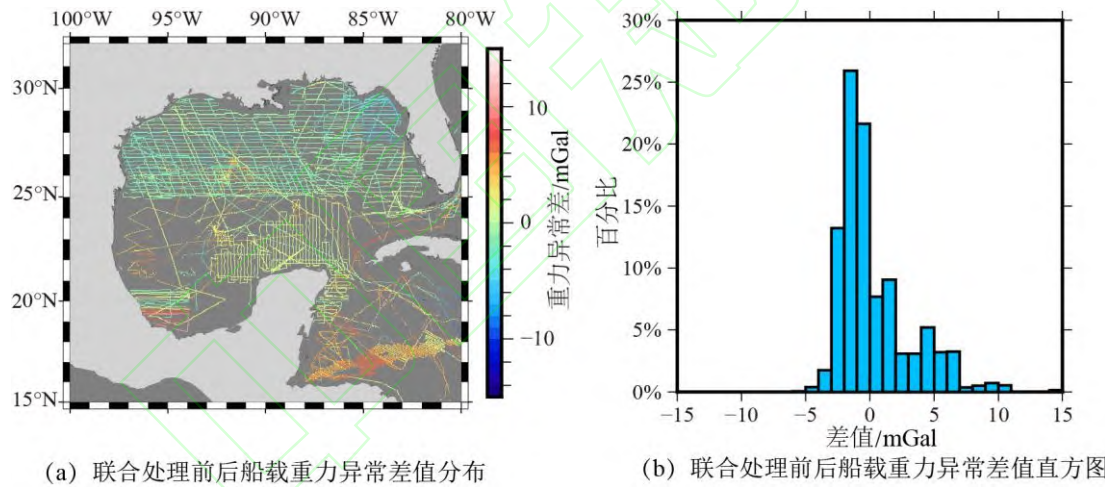


图 6 联合处理前后船载重力异常差值分布及直方图

Fig. 6 Distribution and Histogram of Shipborne Gravity Anomaly Differences Before and After Joint Processing

另一方面，本文又使用最邻近算法将航线附近的区域格网化，将航线附近的格网重力异常数据与 SIO V32.1 模型进行比较。分别对 SIO V32.1 模型与处理前后的航线附近格网船载数据的残差进行统计分析，结果见表 9。由表 9 可知，船载重力异常在联合处理后相对于处理前也有了明显的改进。

表 9 SIO V 32.1 模型与联合处理前后航线附近格网数据残差统计 (mGal)

Tab. 9 Statistics of Residual Between SIO V 32.1 Model and Grid Shipborne Data Before and After Reprocessing (mGal)

	Max	Min	Mean	STD	RMS
--	-----	-----	------	-----	-----

模型与处理前船载重力异常格网数据残差	130.24	-80.74	1.42	7.05	7.19
模型与处理后船载重力异常格网数据残差	83.18	-37.53	-0.14	4.16	4.16

#### 2.4.2 船载重力频率域分析

为了能够在频率域上更加精确地反映出船载重力异常数据在处理前后误差分布的情况，本文选取了 SIO V32.1 重力异常模型作为参考模型，对处理前与处理后的船载重力异常数据进行功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD) 分析<sup>[39]</sup>。由于船载重力异常数据与 SIO V32.1 重力异常模型相互独立，为了反映出处理前与处理后船载重力异常误差的差异，本文分别基于处理前与处理后船载重力异常数据与 SIO V32.1 重力异常模型差值的 PSD 做比较分析。

由于研究区域中不同航线的采样频率有较大的差距，为了更加普遍性的反映问题，本文一共选取了六条航线分为两组来分别进行功率谱密度分析。第一组中含有 3 条航线，航线编号分别为 u871pr、rc1003、v1704，航线上相邻测点之间的平均距离为 2.8km；第二组中也含有三条航线，航线编号为 kea06-70、mw8909、u171gm，航线上相邻测点之间的平均距离为 0.25km。分别计算这 6 条航线在处理前后的重力异常数据与 SIO V32.1 模型重力异常之间的差值，对第一组差值在航线上进行间隔为 2.8km 的重采样，对第二组差值在航线上进行间隔为 0.25km 的重采样，并分别把两组内三条航线差值数据合并。对这两组重采样后的差值数据进行功率谱密度分析。两组功率谱密度分别见图 7 (a) 和图 7 (c)。



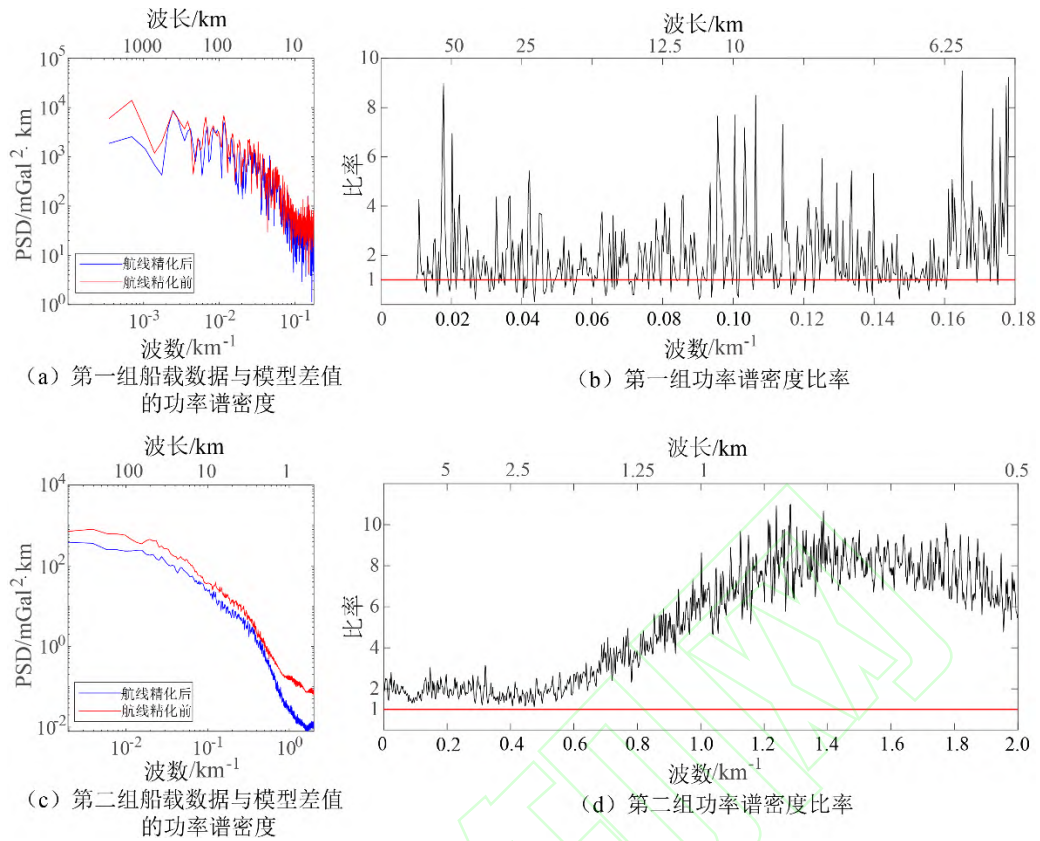


图 7 船载重力异常数据与 SIO V32.1 模型差值的功率谱密度

Fig. 7 Power Spectral Density of the Difference Between Shipborne Gravity Anomaly Data and SIO V32.1 Model

如图 7 (a) 所示, 当波数小于  $0.01\text{km}^{-1}$  时, 其波长范围在  $100\text{km}$  以上, 对比该组差值的波数范围, 其属于长波部分, 与处理前相比, 处理后的船载重力异常数据与 SIO V32.1 模型差值的功率谱密度大部分都明显偏小, 这证明了之前二次项改正对长波误差起到了明显的抑制作用。为了进一步分析波数大于  $0.01\text{ km}^{-1}$  时的差值功率谱密度大小, 将处理前的船载重力异常数据与模型差值的功率谱密度除以处理后的船载重力异常数据与模型差值的功率谱密度, 得到改正前后差值的功率谱密度比率, 结果见图 7 (b)。当比率大于 1 时, 说明在该波数域处理后的船载重力异常数据误差小于处理前的数据; 反之, 当比率小于 1 时, 说明在该波数域处理后的船载重力异常数据误差大于处理前的数据<sup>[40]</sup>。由图 7 (b) 可以看出, 当波数大于  $0.01\text{ km}^{-1}$  时, 功率谱比率绝大部分都大于 1 (红色线段之上)。对于第二组数据, 如图 7 (c) 所示, 在所有波数范围内, 该组航线的重力异常数据在处理与模型差值的功率谱密度都明显小于处理前与模型差值的功率谱密度。同样, 为了进一步观察精化前 PSD 与精化后 PSD 在各个波数处差异的大小, 采用与第一组相同的方法获得改正前与改正后差值的功率谱密度比率, 如图 7 (d), 可见在相应的波数范围内, 比率都大于 1。

另外由图 (a) 和 (c) 对比可以发现, 第二组的改正效果要明显好于第一组。为了更深入分析其中的原因, 这里分别给出两组数据中船载重力异常与 SIOV32.1 模型重力异常的差

值时间序列，结果见图 8 和图 9。

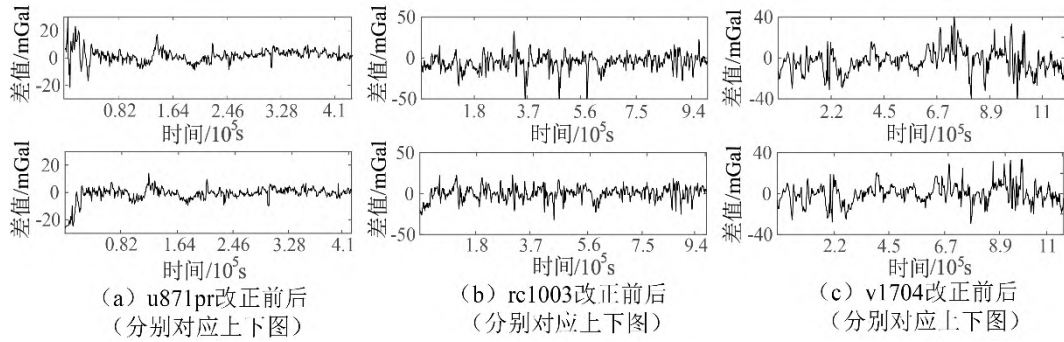


图 8 第一组中三条航线与模型差值时间序列

Fig. 8 Time Series of the Differences Between the Three Ship Tracks in the First Group and the Model

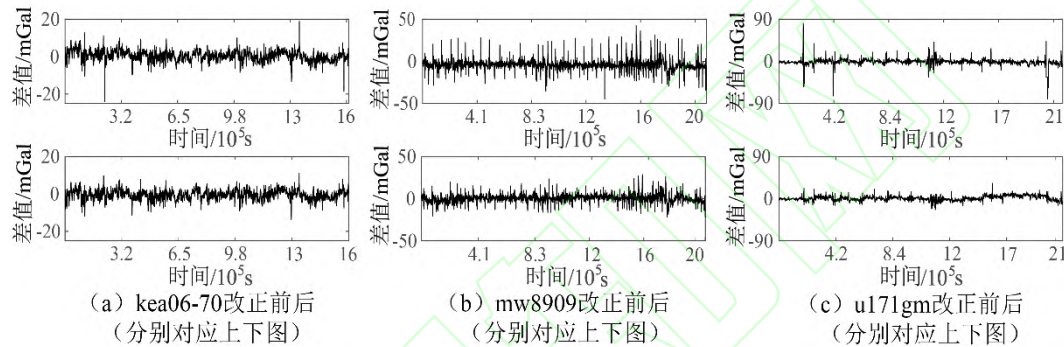


图 9 第二组中三条航线与模型差值时间序列

Fig. 9 Time Series of the Differences Between the Three Ship Tracks in the Second Group and the Model

很明显图 9 中三条航线的差值随时间变化的更快，具有更多的高频信号，同时图 9 中三条航线改正后的效果相比于图 8 更加明显，这主要是由于第二组的差值震荡幅度更小，相比于第一组的差值在时间上更具有规律性，而系统误差改正时所使用的混合多项式模型含有周期项改正，对这类数据改正效果会更明显；又因为第二组中含有更多中高频信号，因此该组船载重力数据在波数  $0.8\text{km}^{-1}$  以上部分改正效果更加突出。

通过对以上两组不同采样频率航线的重力异常数据做功率谱分析，可以看到对于不同采样频率的航线，处理后的重力异常数据在各波数范围内的误差均有所减少，这也证明了本文船载重力异常数据处理方法的有效性。

### 3 结语

本研究构建了一套完整的船载数据再处理流程，并选用墨西哥湾海域为实验区域，对该区域内多源、不同精度的船载重力异常历史数据进行联合再处理。在对航线数据进行粗差航线与粗差点剔除的基础之上，利用正常重力公式推导的二次项改正模型对各航线数据进行长波误差改正与基准统一，并采用交差点平差与多项式系统误差补偿模型相结合的方式对航线

系统误差作进一步补偿。经过一系列方法联合处理之后, 船载重力异常数据的内符合精度与外符合精度均得到明显提升。采用阈值排除法和现代稳健估计法对隐藏在航线中的大粗差和小粗差进行剔除, 交叉点不符值 RMS 由粗差剔除前的 12.10mGal 减少为 6.56mGal; 由正常重力公式引出的二次多项式可以有效地解决船载数据参考基准不统一、长波误差等问题; 采用交叉点条件平差与系统误差模型推估相结合的方式可进一步对系统误差进行补偿, 削弱交叉点不符值, 经过联合处理之后, 交叉点不符值 RMS 由 6.56mGal 减少至 3.70mGal, 与 SIO V32.1 模型残差 RMS 由 6.62mGal 减少至 3.91mGal, 重力异常数据内外符合精度都得到有效提升。本文还对两组不同采样频率的航线与 SIO V32.1 模型的差值进行功率谱分析, 发现在本文的联合方法处理之后, 不同采样频率的航线在各个波数域的精度都得到了较好的提升, 并且对于与模型差值的时间序列更具有规律性的航线, 其改正效果会更加明显。

## 参考文献:

- [1] Hackney R I, Featherstone W E. Geodetic Versus Geophysical Perspectives of the ‘Gravity Anomaly’[J]. *Geophysical Journal International*. 2003, 154(1): 35-43. DOI: 10.1046/j.1365-246X.2003.01941.X.
- [2] Guo J, Luo H, Zhu C, et al. Accuracy Comparison of Marine Gravity Derived From HY-2A/GM And Cryosat-2 Altimetry Data: A Case Study in The Gulf of Mexico[J]. *Geophysical Journal International*. 2022, 230(2): 1267-1279. DOI: 10.1093/gji/ggac114.
- [3] Fairhead J D, Green C M, Odegard M E. Satellite-Derived Gravity Having an Impact on Marine Exploration[J]. *The Leading Edge*. 2001, 20(8): 873-876. DOI: 10.1190/1.1487298.
- [4] Haxby w F, Karner G D, Labrecqu J L, et al. Digital Images of Combined Oceanic and Continental Data Sets And Their Use In Tectonic Studies[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 1983, 64 (52): 995-1004. DOI: 10.1029/EO064i052p00995.
- [5] Lu B, Xu C, Li J, et al. Marine Gravimetry and Its Improvements to Seafloor Topography Estimation In The Southwestern Coastal Area Of The Baltic Sea[J]. *Remote Sensing*. 2022, 14(16): 3921. DOI: 10.3390/rs14163921.
- [6] Gaina C, Roest W R, Müller R D, et al. The Opening of The Tasman Sea: A Gravity Anomaly Animation[J]. *Earth Interactions*. 1998, 2(4): 1-23. DOI: 10.1175/1087-3562(1998)002<0001:TOOTTS>2.3.CO.
- [7] Sandwell D T, Smith W H F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS 1 Satellite Altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1997, 102(B5): 10039-10054. DOI: 10.1029/96JB03223.
- [8] Xing Leling, Li Hui, Xuan Songbo, et al. Long-Term Gravity Changes in Chinese Mainland from GRACE and Terrestrial Gravity Measurements[J]. *Chinese Journal Geophysics*. 2012, 55(5): 1557-1564. DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.013. (邢乐林, 李辉, 玄松柏, 等. GRACE 和地面重力测量监测到的中国大陆长期重力变化[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(5): 1557-1564. DOI: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.013.)
- [9] Sun Zhongmiao, Zai Zhenhe, Li Yingchun. Status and Development of Airborne Gravimeter. *Progress in Geophysics*. 2013, 28(1): 1-8. DOI: 10.6038/pg20130101. (孙中苗, 翟振和, 李

- 迎春. 航空重力仪发展现状和趋势[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 1-8. DOI: 10.6038/pg20130101.)
- [10] Lu B, Barthelmes F, Li M, et al. Shipborne Gravimetry in the Baltic Sea: Data Processing Strategies, Crucial Findings and Preliminary Geoid Determination Tests[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(7): 1059-1071. DOI: 10.1007/s00190-018-01225-7
- [11] Ke Baogui, Zhang Chuanyin, Guo Chunxi, et al. System Error Correction for Shipborne Gravimetric Data from Different Regions of Offshore in China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(3): 417-421. (柯宝贵, 章传银, 郭春喜, 等. 船载重力测量数据不同测区系统偏差纠正方法研究[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2015, 40(3): 417-421.)
- [12] Dehlinger P. *Marine Gravity*[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.
- [13] Ning Jinsheng, Huang Motao, Ouyang Yongzhong, et al. Progress In Marine and Airborne Gravimetry Technology[J]. *Hydrographic surveying and charting*. 2014, 34(3): 67-72. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3044.2014.03.018 (宁津生, 黄谟涛, 欧阳永忠, 等. 海空重力测量技术进步[J]. 海洋测绘, 2014, 34(3): 67-72. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3044.2014.03.018)
- [14] Torge W. *Gravimetry*[M]. Berlin: Walter de Gruyter, 1989.
- [15] Van Hees G L S. Gravity Survey of The North Sea[J]. *Marine Geodesy*. 1983, 6(2): 167-182. DOI: 10.1080/15210608309379453.
- [16] Prince R A, Forsyth D W. A Simple Objective Method for Minimizing Crossover Errors in Marine Gravity Data[J]. *Geophysics*. 1984, 49(7): 849-1121. DOI: 10.1190/1.1441722.
- [17] Hwang C, Hsiao Y S, Shih H C, et al. Geodetic and Geophysical Results from Twiwan Airborne Gravity Survey: Data Reduction and Accuracy Assessment[J]. *Journal Geophysical Research*. 2007, 112(B4): B04407. DOI: 10.1029/2005JB004220.
- [18] Hunegnaw A, Hipkin R G, Edwards J. A Method of Error Adjustment for Marine Gravity with Application to Mean Dynamic Topography in The Northern North Atlantic[J]. *Journal of Geodesy*. 2009, 83(2):161-174. DOI: 10.1007/s00190-008-0249-2.
- [19] Yu Hongjuan, Guo Jinyun, Liu Yang, et al. Precision Analysis on CG-5 Relative Gravimeter through Field Experiments. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(3): 155-160. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2017.03.028.  
于红娟, 郭金运, 刘扬, 等. CG-5 相对重力仪野外实验精度分析[J]. 测绘科学, 2017, 42(3): 155-160. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2017.03.028.
- [20] Manoussakis G, Korakitis R, Milas P. Gravimetric Estimation of The Eötvös Matrix Components[J]. *Contributions to Geophysics and Geodesy*. 2017, 47(1): 53-68. DOI: 10.1515/congeo-2017-0004
- [21] Lacoste L J B. Crosscorrelation Method for Evaluating and Correcting Shipboard Gravity Data[J]. *Geophysics*. 1973, 38(4): 701-709. DOI: 10.1190/1.1440369.
- [22] Deng Kailiang, Huang Xianyuan, Liu Xiaowei, et al. Detection of Gross Errors in Ship-borne Gravity Data Based on Window-moving RMS Model[J]. *Hydrographic Surveying and*



- Charting. 2016, 36(3): 7-9. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3044.2016.03.002. (邓凯亮, 黄贤源, 刘骁炜, 等. 基于窗口移动中误差模型探测船载重力数据粗差[J]. 海洋测绘, 2016, 36(3): 7-9. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3044.2016.03.002.)
- [23] Huang M T, Zhai G J, Guan Z, et al. On The Compensation of Systematic Errors in Marine Gravity Measurements[J]. Marine Geodesy. 1999, 22(3): 183-194. DOI:10.1080/014904199273452.
- [24] Huang Motao, Zai Guojun, Ouyang Yongzhong, et al. Two-Step Processing for Compensating the Systematic Errors in Marine Gravity Measurements[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2002, 27(3): 251-255. DOI: 10.13203/j.whugis2002.03.005. (黄谟涛, 翟国君, 欧阳永忠, 等. 海洋重力测量误差补偿两步处理法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(3): 251-255. DOI: 10.13203/j.whugis2002.03.005.)
- [25] Christeson G L, Van Avendonk H J A, Norton I O, et al. Deep Crustal Structure in the Eastern Gulf of Mexico[J]. Journal of Geophysical Research. Solid Earth, 2014, 119(9): 6782-6801. DOI: 10.1002/2014JB011045.
- [26] Mulet S, Rio M H, Etienne H, et al. The New CNES-CLS18 Global Mean Dynamic Topography[J]. Ocean Science. 2021, 17(3): 789-808. DOI: 10.5194/OS-17-789-2021.
- [27] Zingerle P, Pail R, Gruber T, et al. The Combined Global Gravity Field Model XGM2019e[J]. Journal of Geodesy. 2020, 94(7): 66. DOI: 10.1007/s00190-020-01398-0.
- [28] Sandwell D T, Harper H, Tozer B, et al. Gravity Field Recovery from Geodetic Altimeter Missions[J]. Advances in Space Research. 2021, 68: 1059-1072. DOI: 10.1016/j.asr.2019.09.011
- [29] HUANG Motao, DENG Kailiang, OUYANG Yongzhong, et al. Application of Satellite Altimeter-Derived Gravity Model in the Error Detection of Shipborne and Airborne Gravimetry[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology. (Natural Science Edition). 2022, 50(9): 126-133. DOI: 10.13245/j.hust.220918. (黄谟涛, 邓凯亮, 欧阳永忠, 等. 卫星测高重力模型在海空重力测量误差检测中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 126-133. DOI: 10.13245/j.hust.220918.)
- [30] Wessel P, Watts A B. On the Accuracy of Marine Gravity Measurements[J]. Journal Of Geophysical Research, Solid Earth. 1988, 93(B1): 393-413. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb07013.x.
- [31] Miloš P. On the Normal Gravity Formulae[J]. Studia Geophysical et Geodaetica. 1990, 34(4): 289-312. DOI: 10.1007/BF02316951.
- [32] Hwang C, Parsons B. Gravity Anomalies Derived from Seasat, Geosat, ERS-1 and TOPEX/POSEIDON Altimetry and Ship Gravity: A Case Study Over the Reykjanes Ridge[J]. Geophysical Journal International. 1995, 122(2): 551-568. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb07013.x.
- [33] Liu Yanchun, Li Mingsan, Huang Motao. The Rank-Defect Adjustment Model for Survey-Line Systematic Errors in Marine Survey Net[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2001, 26(6): 533-538. DOI: 10.13203/j.whugis2001.06.013. (刘雁春, 李明叁, 黄谟涛. 海洋测线网系统误差调整的秩亏网平差模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(6): 533-538. DOI: 10.13203/j.whugis2001.06.013.)
- [34] Wessel P. XOVER: A Cross-Over Error Detector for Track Data[J]. Computer & Geosciences. 1989, 15(3): 333-346. DOI: 10.1016/0098-3004(89)90044-7.
- [35] Wessel P. Tools for Analyzing Intersecting Tracks: The X2sys Package[J]. Computer &



Geosciences. 2010, 36(3): 348-354. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.05.009.

- [36] Wei Jiancheng. Research on Advance Data Processing Technology for Air-sea Gravimetry[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (韦建成. 海空重力数据精细化处理技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.)
- [37] Huang Motao, Guan Zheng, Zhai Guojun, et al. The Self-Calibrating Adjustment of Marine Gravity Survey Network[J]. Acta Geodactica et Cartographica Sinica, 1999, 28(2): 162-171. (黄谟涛, 管铮, 翟国君, 等. 海洋重力测量网自检校平差[J]. 测绘学报, 1999, 28(2): 162-171.)
- [38] Pyrchla K, Pajak M, Pyrchla J, et al. Analysis of Free-Air Anomalies on the Seaway of the Gulf of Gdańsk: A Case Study[J]. Earth and Space Science. 2020, 7(5): e2019EA000983, DOI: 10.1029/2019EA000983.
- [39] Pujol M I, Schaeffer P, Faugère Y, et al. Gauging the Improvement of Recent Mean Sea Surface Models: A New Approach for Identifying and Quantifying Their Errors[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans. 2018, 123(8): 5889-5911. DOI: 10.1029/2017JC013503.
- [40] Zhu C, Liu X, Guo J, et al. Sea Surface Heights and Marine Gravity Determined from SARAL/Altika Ka-Band Altimeter over South China Sea[J]. Pure and Applied Geophysics. 2021, 178: 1513-1527. DOI: 10.1007/s00024-021-02709-y.

#### 网络首发:

**标题:** 基于多源船载重力异常数据的联合再处理——以墨西哥湾为例

**作者:** 郭金运, 张鸿飞, 李真, 祝程程, 刘新, 罗洪鑫

**DOI:** 10.13203/j.whugis20230088

**收稿日期:** 2023-06-04

#### 引用格式:

郭金运, 张鸿飞, 李真, 等. 基于多源船载重力异常数据的联合再处理——以墨西哥湾为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230088 (Guo Jinyun, Zhang Hongfei, Li Zhen, et al. Joint Reprocessing of Shipborne Gravity Anomalies based on Multi-Sources: A Case Study of the Gulf of Mexico[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j. whugis20230088)

**网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!**

---

#### 您感兴趣的其他相关论文:

西太平洋海域卫星测高重力数据精度分析

张菲菲, 王皓, 张义蜜, 韩波, 王万银

武汉大学学报(信息科学版), 2023-05-30 14:33, doi: 10.13203/j.whugis20220429

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220429>