

**“2020 年重磁方法理论及应用研究专题研讨会”专栏 编者按** 重、磁方法是一种传统而又焕发活力的地球物理方法,在地球内部和外部的科学研究中发挥着应有的作用。由长安大学、西安石油大学、《物探与化探》编辑部和中国地球物理学会海洋地球物理专业委员会共同主办的“2020 年重磁方法理论及应用研究专题研讨会”于 2020 年 1 月 11 日在长安大学召开。专题研讨会的宗旨是围绕重、磁方法理论及应用研究,交流研究成果、讨论研究方向、促进合作与发展。来自国内高等院校、自然资源部、中石油、核工业、中国地震局等 47 个单位 200 余名代表参加了此次专题研讨会,共有 7 个特邀口头报告、19 个口头报告和 11 个展板报告。经专家推荐和评审,优选 12 篇论文以专栏的形式发表,内容涵盖仪器性能对比、软件开发、处理和转换、反演和解释等多个方面。重磁方法理论及应用研究专题研讨会的举办和专栏文章的发表必将促进各单位之间的合作与交流,推动重、磁方法的发展。

doi: 10.11720/wtyht.2020.0077

张菲菲,孙建伟,韩波,等.SAG-2M 型与 KSS31M 型海洋重力仪比测结果分析[J].物探与化探,2020,44(4):870-877.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0077

Zhang F F, Sun J W, Han B, et al. The result analysis of the comparison between SAG-2M and KSS31M marine gravimeters[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(4): 870-877. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0077

# SAG-2M 型与 KSS31M 型海洋重力仪比测 结果分析

张菲菲<sup>1,2,3,4,5</sup>, 孙建伟<sup>1,2</sup>, 韩波<sup>1,2</sup>, 杜润林<sup>1,2</sup>, 王万银<sup>3,4,5</sup>

(1.自然资源部天然气水合物重点实验室 青岛海洋地质研究所,山东 青岛 266071; 2.海洋国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,山东 青岛 266071; 3.长安大学 重磁方法技术研究所,陕西 西安 710054; 4.长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054; 5.长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安 710054)

**摘要:**为检验我国自主研发的 SAG-2M 型海洋重力仪的技术性能,验证其获取重力数据的可靠性,选用德国 KSS31M 型海洋重力仪开展同船比测工作。按照海洋地质调查规范分别处理了 2 台重力仪的原始重力数据,对 2 台重力仪得到的自由空间重力异常数据的交点差、测线及网格数据进行了对比分析及相关性分析。数据对比分析结果表明,两种型号重力仪测量精度相当,数据异常形态及变化趋势一致,幅值基本吻合,两者数据高度线性相关。通过此次同船比测工作,认为我国自主研发的 SAG-2M 型海洋重力仪平台稳定,测量精度与德国 KSS31M 型海洋重力仪相当,该比测结果对今后 SAG-2M 型海洋重力仪的研发及测量工作具有重要参考价值。

**关键词:** SAG-2M 型海洋重力仪; KSS31M 型海洋重力仪; 同船比测; 技术性能; 测量精度

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2020)04-0870-08



## 0 引言

海洋重力测量是海洋地球物理测量的主要技术

手段之一,重力数据在现代国防领域、深海资源勘探领域以及地球科学研究领域中有广泛的应用<sup>[1-5]</sup>,是国家的重要战略资源。受研究目标的需求,获得精度更高、分辨率更好的重力场数据是未来海洋重

收稿日期: 2020-02-18; 修回日期: 2020-05-09

**基金项目:** 中国地质调查局项目(DD20191003); 国家自然科学基金重点支持项目“琉球海沟俯冲带岩石圈结构与流体循环——海洋大地电磁与地震数据约束”(91958210)

**作者简介:** 张菲菲(1983-),女,助理研究员,在读博士研究生,主要从事海域重、磁数据处理及解释应用研究工作。Email: ffeizhang@126.com

**通讯作者:** 王万银(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事重、磁位场理论及应用研究和教学工作。Email: wwy7902@chd.edu.cn

力测量的一项重要任务,而海洋重力数据的精度依赖于采集设备的稳定性能和测量精度。目前,国内外海洋重力调查中使用的主流海洋重力测量设备主要是德国的 KSS31 型海洋重力仪、美国的 L&R 型海洋重力仪、美国的 BGM 型海洋重力仪以及俄罗斯与加拿大合作生产的 GT 型海洋重力仪<sup>[1-2,6-7]</sup>,仪器测量精度均可达到  $1\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ 。国内海洋重力仪研制起步比较晚,最早是从 20 世纪 60 年代开始开展海洋重力仪的研制工作,但均未形成成熟的商业化产品。近年来,随着科技的发展,国内针对海洋重力仪进行了积极的研制工作,其中比较有代表性的是中国航天科技集团公司第九研究院第十三研究所(航天十三所)自主研发的海洋重力仪 SAG-2M 型海洋重力仪<sup>[7]</sup>,该重力仪为捷联惯导式重力仪,测试内符合精度为  $1\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ ,并实现了小批量生产。

2018 年青岛海洋地质研究所拟引进一套 SAG-2M 重力仪,根据现行的海洋重力测量规范<sup>[8-9]</sup>,新重力仪投入使用前需明确测量仪器的指标要求,对技术指标进行验证和评估是测量作业规程中非常重要的组成部分。海洋重力仪的技术性能指标一般包括测量范围(量程)、抗干扰能力(动态范围)、动态重复测量精度、零点漂移特性、采样率和工作温度等内容<sup>[10-11]</sup>,其中动态重复测量精度是海洋重力仪最关键的技术指标。动态重复测量精度可以通过实验室动态重复观测和海洋实际工作两种方式进行检验<sup>[10]</sup>,海洋实际工作的测量精度更能体现测量环境时空变化对重力测量成果的影响。海洋作业验证新重力仪的测量精度可以用外部符合方法对重力仪的实际测量精度进行检验,即采用两台或多台重力仪同平台观测,通过对比不同仪器在同一时刻的观测结果获取参试重力仪测量精度的评估信息,该方法被国内外多家海洋调查和科研机构所广泛使用,并取得了较好的比测结果。欧阳永忠等<sup>[12]</sup>对 GT-1A、TAGS、L&R S II、SGA-WZ01 和 GDP-1 五套航空重力仪进行了同机测试,对所获取的重复线和测网成果数据进行了对比分析,GT-1A 型航空重力仪综合性能技术指标最佳,国产 SGA-WZ01 捷联航空重力仪具有最佳的重复线测量精度,此项工作掌握了多类型商业重力仪的技术性能指标,验证国产重力仪数据可靠性;张向宇等<sup>[13]</sup>对 GT-2M、KSS31M 和 ZLS 三种不同类型的重力仪进行了同船比测工作,测试结果表明,相同的测量条件下,3 种型号重力仪的测量结果一致性较好,GT-2M 型重力仪数据精度略好;张振波<sup>[14]</sup>对 GT-1M 和 KSS31M 海洋重力仪进行了比对,以验证 GT-1M 重力仪的可靠性,测试结果

表明 2 台重力仪测量结果吻合,但是该工作中 KSS31M 重力数据使用的是网格数据,而不是同船比测数据。国外也有过 GT 与美国 L&R 重力仪同船比对测量的实例<sup>[15]</sup>,但是针对 SAG-2M 型海洋重力仪的同船测试结果较少,研发单位曾开展过与 GT-1A 型重力仪的测试比对,比对精度小于  $1\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ ,但未见详细测试结果。

为系统了解并检测 SAG-2M 型海洋重力仪的技术性能和工作特点,青岛海洋地质研究所于 2018 年 8 月搭载 SAG-2M 和 KSS31M 重力仪进行了同船比测工作,并对所获取的重力数据进行了数据处理及对比分析。这 2 种型号的海洋重力仪传感器和工作原理有所不同,但仪器的技术性能指标相近,通过同船比测及数据对比分析可以深入了解不同型号海洋重力仪的工作特点,验证新重力仪数据可靠性,为开展相关技术与未来装备选型提供重要参考依据。

1 SAG-2M 和 KSS31M 海洋重力仪参数对比

1.1 SAG-2M 海洋重力仪基本参数

SAG-2M 型海洋重力仪是航天十三所自主研发的海洋重力仪,该重力仪采用高精度石英加速度计式重力传感器,将重力传感器集成于捷联惯性/GNSS 组合系统中,通过捷联惯性/GNSS 组合系统数学解算计算出重力传感器敏感轴指向,然后经过坐标分解得出重力传感器测量值的垂向分量。

SAG-2M 型海洋重力仪系统主要的测量部件为重力仪主机(图 1),主机内部集成了石英加速度计式重力传感器、高精度光纤陀螺仪、二次电源转换电路、计算机电路、重力传感器高精度信号转换电路、GNSS OEM 板卡、高精度温控电路等。重力仪主要



图 1 SAG-2M 型海洋重力仪主机

Fig.1 The main frame of SAG-2 Mmarine gravimeter

配套部件包括显控记录装置、UPS 电源单元和减震支架。该海洋重力仪结构简单,体积小,与传统海洋重力仪相比无 CC 效应,传感器动态范围宽,对载体平台动态环境适应性好,主要技术参数见表 1。

1.2 KSS31M 型海洋重力仪基本参数

KSS31M 型海洋重力仪是德国 Bodensee 公司生产的海洋重力仪<sup>[16-19]</sup>,其平台抗干扰能力强,仪器测量精度高,被国内外多家单位和科研机构使用,工作性能得到业内认可。该重力仪采用直立弹簧式重力传感器,重力采集系统主要由两部分组成(图 2),分别是重力探头及陀螺平台稳定系统(KT31)和数据采集控制系统(DHS),其主要技术参数见表 1 所示。该型号海洋重力仪抗干扰能力强,仪器测量精度高,通常小于  $1\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ 。

2 数据采集及处理

2.1 数据采集

2018 年 8 月青岛海洋地质研究所组织 SAG-2M 及 KSS31M 型海洋重力仪同船搭载“海大号”综合



图 2 KSS31M 型海洋重力仪

Fig.2 KSS31 Mmarine gravimeter

科考船执行调查采集任务,共采集测线 44 条,其中主测线 25 条,联络测线 19 条,测线布设见图 3。数据采集过程严格按照仪器操作和海洋地质调查规范执行,测量期间仪器运行正常,在同一泊位进行重力基点比对测量,月漂移量均小于  $2.0\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ 。

2.2 数据处理

本次数据处理依据新版海洋地质调查规范<sup>[1-2,9-10,20]</sup>,利用 CGG 公司 LCT 重磁处理软件进行了数据处理,处理步骤及参数如下。

表 1 SAG-2M 与 KSS31M 海洋重力仪技术参数对比

技术参数	SAG-2M	KSS31M
测量范围/ $(10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2})$	$\pm 20000$	$\pm 10000$
横摇	全姿态	$\pm 40^\circ$
纵摇	全姿态	$\pm 40^\circ$
静态精度/ $(10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.02	0.02
动态精度/ $(10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2})$	1	0.5~2
主机尺寸、重量	29 cm×26 cm×28 cm、18 kg	68 cm×53 cm×53 cm、72 kg

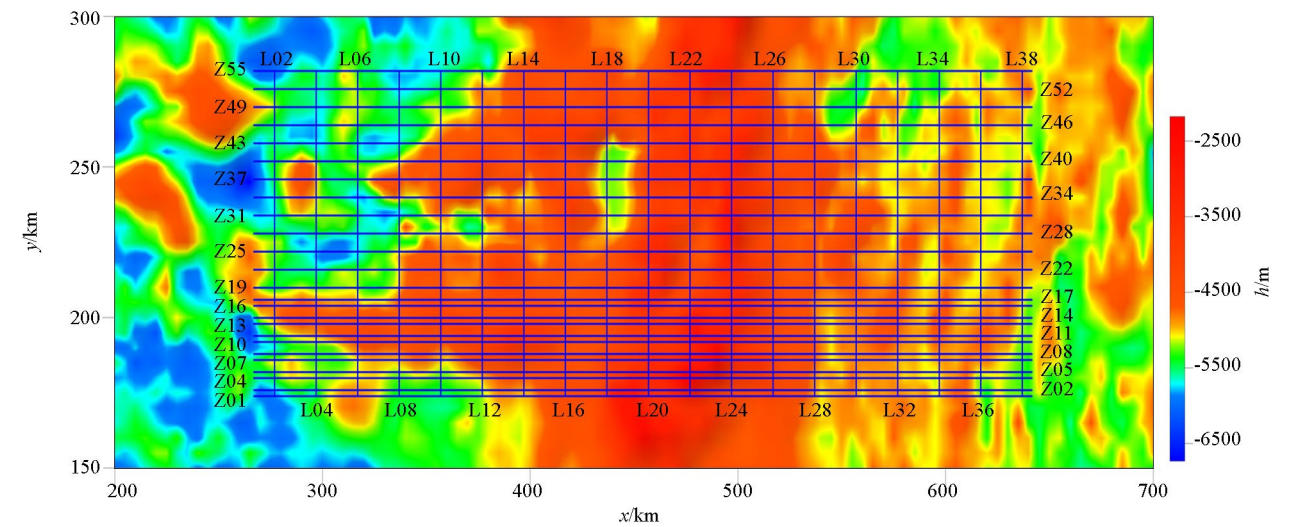


图 3 测线布设(底图为测区地形)

Fig.3 Distribution map of survey lines (residual topographic map)



1) 数据读取。SAG-2M 和 KSS31M 重力仪采样间隔为 1 s,对原始采集数据进行了整理,按照时间提取了各测线相关数据项:年、儒列日、时、分、秒、重力仪读数。为了进行位置校准,从同船导航数据中提取了经度、纬度数据。

2) 延迟校正。SAG-2M 和 KSS31M 海洋重力仪测量的重力读数与实时的 GPS 定位数据之间存在滤波延迟,数据处理时需要根据仪器所选档位的滤波延迟时间对重力读数进行延迟校正。本次测量过程中 SAG-2M 型海洋重力仪滤波延迟时间为 189 s, KSS31M 型海洋重力仪滤波延迟时间为 76 s。

3) 零点漂移校正。重力仪零点漂移均按照线性变化处理,根据出航及返航在港口码头重力基点处重力读数,计算零漂量,按照时间分配到重力仪读数上。零点漂移计算公式为<sup>[1-2]</sup>:

$$\delta_R = \frac{-g_{\text{零漂}}}{t_2 - t_1} \times (t_i - t_1), \tag{1}$$

其中: $t_1$  为航次起始时基点读数时间; $t_2$  为航次结束时基点读数时间; $t_i$  为采样点观测时读数时间; $g_{\text{零漂}}$  为零点漂移量,单位  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ ; $\delta_R$  为零点漂移改正值,单位  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

4) 厄特渥斯校正。厄特渥斯效应是走航式重力测量过程中,科氏力对于安装在测量船上的重力仪所施加的影响,导致测量重力值与实际重力值不符,该效应与航向、航速和船只所在的地理纬度有关。为了消除厄特渥斯效应,利用定位数据计算了船只的航速、航向,对所有测线数据进行了厄特渥斯改正,厄特渥斯改正公式为<sup>[1-2]</sup>:

$$\delta_{ge} = 7.499 \times V \times \sin A \cdot \cos \varphi + 0.004V^2, \tag{2}$$

其中, $\delta_{ge}$  为厄特渥斯改正值,单位  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ ; $V$  为航速,单位  $\text{m/h}$ ; $A$  为航向角; $\varphi$  为测点的地理纬度。

5) 正常场校正。采用 CGCS2000 正常重力公式计算正常重力场,其计算公式为<sup>[1-2,21]</sup>:

$$\gamma_0 = 978032.53349 \times \frac{1 + 0.00193185297052\sin^2\varphi}{\sqrt{1 - 0.0066943780229\sin^2\varphi}}, \tag{3}$$

其中: $\gamma_0$  为正常重力场值,单位  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ ; $\varphi$  为测点的地理纬度。

6) 自由空间重力异常计算。测点自由空间重力异常计算公式为:

$$g = g_0 + C\Delta s + \delta_R + \delta_{ge} - \gamma_0, \tag{4}$$

其中: $g$  为测点的自由空间重力异常值,单位  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ ; $g_0$  为基点绝对重力值,单位  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ ; $C$  为重力仪格值常数; $\Delta s$  为测点与基点之间的重力仪读数

差,单位  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

3 数据比对分析

为方便讨论测量精度问题,笔者使用了 3 个衡量测量精度的指标参数<sup>[11,22-23]</sup>,分别为平均绝对偏差( $mad$ )、均方根( $rms$ )以及标准偏差( $std$ ),使用相关系数( $r_{ab}$ )来衡量 2 组数据之间的相关性,计算公式分别为:

$$mad = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - b_i), \tag{5}$$

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}{n}}, \tag{6}$$

$$std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i - mad)^2}{n}}, \tag{7}$$

$$r_{ab} = \frac{l_{ab}}{\sqrt{l_{aa} \times l_{bb}}}, \tag{8}$$

其中, $l_{ab} = \sum_{i=1}^m (a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})$ , $l_{aa} = \sum_{i=1}^m (a_i - \bar{a})^2$ ,  
 $l_{bb} = \sum_{i=1}^m (b_i - \bar{b})^2$ , $\bar{a} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_i$ , $\bar{b} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m b_i$ 。

为详细评估 2 台重力仪所获得数据的测量精度,依据上述指标参数,对 2 台重力仪自由空间重力数据的交点差、同测线数据、全区网格数据进行了对比分析。

3.1 数据交点差

利用 LCT 重磁处理软件计算了 2 台仪器自身及仪器间的交点差,仪器自身是计算主测线与联络测线交点差,仪器间是计算主测线与另一台仪器的联络测线交点差,表 2 给出了 2 台仪器自身和仪器之间交点差平均绝对偏差、均方根及标准偏差的统计结果。主测线与联络测线之间交点共有 480 个,交点差统计结果可以看出 2 台仪器在本次的测量中精度较高,优于  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,两者的自身交点差相近,表明 2 台仪器处理后数据精度相近;2 台仪器之间交点差相近,这说明 2 台仪器处理后数据不存在系统差值。对比所有的交点差结果, SAG-2M 相关的交点差相对小,均小于 KSS31M 自身的交点差,从交点差统计的角度来看,在本次同船比测中, SAG-2M 型海洋重力仪处理后数据精度略优于 KSS31M 型海洋重力仪。

表 2 仪器交点差统计

Table 2 The crossover error between two gravimeters

$10^{-5} \text{ m/s}^2$   
 $10^{-5} \text{ m/s}^2$

仪器名称	KSS31M(联络线)			SAG-2M(联络线)		
	<i>mad</i>	<i>rms</i>	<i>std</i>	<i>mad</i>	<i>rms</i>	<i>std</i>
KSS31M(主测线)	0.6033	0.8163	0.8172	0.5038	0.6576	0.6582
SAG-2M(主测线)	0.5094	0.6760	0.6767	0.4905	0.6506	0.6513

3.2 测线数据比对

选取不同测量位置的 8 条主测线进行了对比分析,将 8 条测线处理后自由空间重力异常以平面剖面图展示(图 4),由图 4 可知,2 台重力仪得到的自由空间重力异常总体趋势一致,异常特征高度相似。但 2 台重力仪在此次测量中也各自存在问题, KSS31M 重力仪在 Z01、Z07、Z28 测线存在跳点数据(图 5 中绿色圆圈所示),而 SAG-2M 重力仪不存在跳点数据;SAG-2M 重力仪在 Z46、Z55 测线存在锯齿状数据(图 5 中紫色矩形框所示),即数据抖动的情況,而 KSS31M 重力仪不存在该情况。

为了分析两者之间的偏差,计算了 2 台重力仪在同一测线的自由空间重力数据的相关系数,两者偏差的平均绝对偏差、均方根以及标准偏差,计算结

果见表 3。由 2 台仪器处理后同测线数据偏差统计结果可得,SAG-2M 与 KSS31M2 台重力仪在 8 条测线上的测量结果高度线性相关,相关系数均>0.99;各测线之间的偏差相当,平均绝对偏差范围(0.59~1.028)×10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>;2 台仪器在同一测线上的标准偏差较小,均<0.8×10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>,同测线偏差统计结果略大于仪器间交点差统计结果。通过对测线自由空间重力异常曲线及数据偏差比对,可知 SAG-2M 重力仪与 KSS31M 重力仪在本次测量中数据处理结果吻合,这也表明 SAG-2M 在此次测量中得到的结果是可靠的。

3.3 网格数据比对

为了更全面地对比 2 台重力仪测量数据之间的关系,对全区网格化数据进行了对比分析。将 2 台

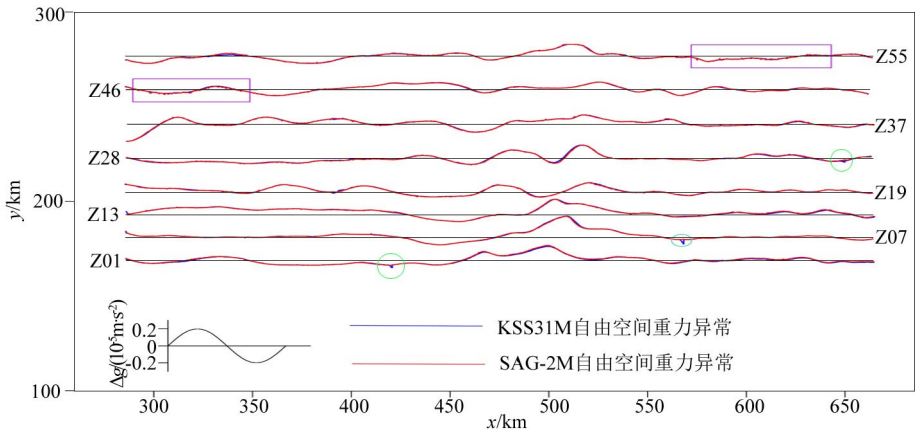


图 4 部分测线自由空间重力异常平面剖面示意

Fig.4 The free air gravity anomaly profile map of parts of survey lines

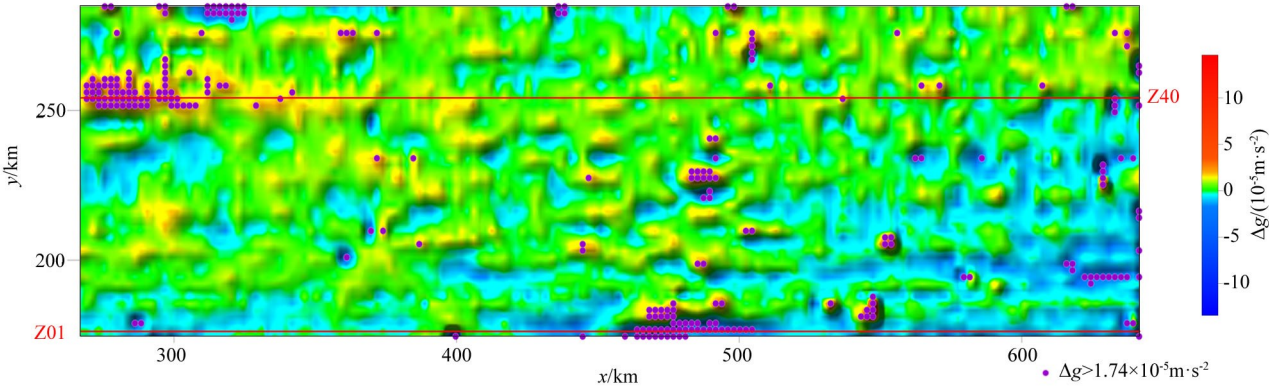


图 5 网格数据偏差分布

Fig.5 The distribution map of grid data deviation

表 3 同测线 2 台重力仪测量偏差统计

Table 3 The deviation of the same survey line between two gravimeters

测线名	$r_{ab}$	$mad/(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$	$rms/(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$	$std/(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$
Z01	0.9969465	1.028	1.28	0.76
Z07	0.9980488	0.49	0.84	0.68
Z13	0.9966732	0.76	0.98	0.62
Z19	0.9960449	0.59	0.78	0.51
Z28	0.9938768	0.81	1.10	0.74
Z37	0.9972808	0.65	0.82	0.49
Z46	0.9957206	0.63	0.81	0.52
Z55	0.9949318	0.73	1.01	0.70
平均值		0.711	0.9525	0.6275

重力仪得到的自由空间重力数据进行了网格化,网格间距为2 km,搜索半径为20 km,共得到网格节点 8 976 个。

对 2 台重力仪全区网格化数据进行了偏差统计(表 4),两者之间相关系数 0.994 5,为高度线性相关,网格数据偏差的绝对平均偏差、均方根以及标准偏差与测线比对结果相近。图 5 为网格数据偏差,两套数据间偏差多分布于 $(-2 \sim 2) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间,约占总网格节点的 97.3%。对数据偏差超过 3 倍标准偏差的点进行了统计(图 5 紫色圆点),偏差较大的网格点共有 248 个点,占总网格节点的 2.76%。选取

偏差较大网格点分布相对较多的测线 Z01 和 Z40,对两台仪器的自由空间重力异常曲线进行对比(图 6),Z01 线偏差较大点位于测线左侧,两台仪器的自由空间重力异常趋势相似,但是 KSS31M 数据有跳动,造成了两者之间偏差较大;Z40 线偏差较大点位于测线中央位置,两台仪器的自由空间重力异常趋势高度相似,但是幅值略有偏差。分析其原因,由于两台仪器的测量原理有所不同,在实际测量中会因为海况或仪器本身信号处理方式不同造成数据之间有所偏差,但不影响整体数据质量。

表 4 网格数据偏差统计

Table 4 The grid data deviation between two gravimeters

$r_{ab}$	$mad/(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$	$rms/(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$	$std/(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$
0.9945	0.59	0.83	0.58

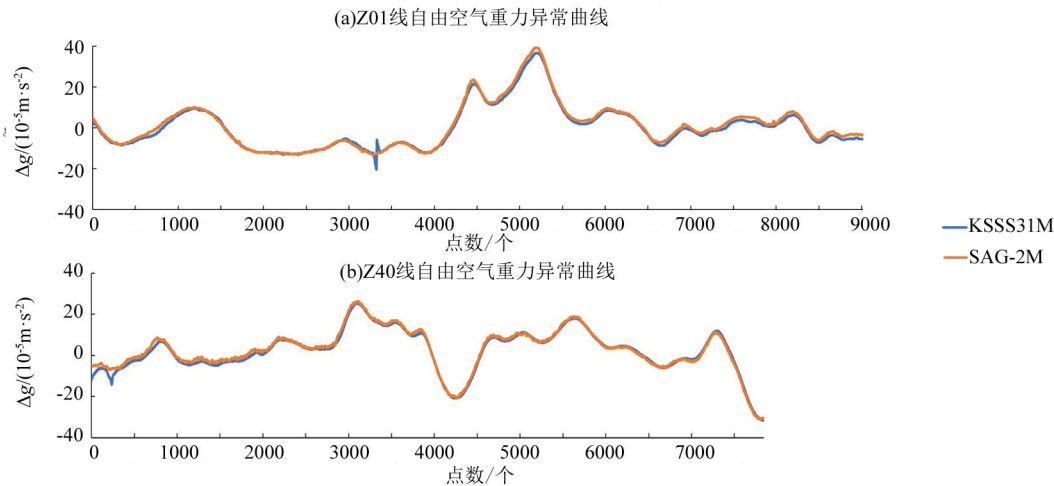


图 6 偏差较大测线自由空间重力异常曲线对比示意

Fig.6 Contrast diagram of free air gravity anomaly with larger data deviation

4 结论

本次同船比测过程中,在同一调查船上获得了

SAG-2M 型海洋重力仪与 KSS31M 型海洋重力仪的同船作业数据。依据海洋地质调查规范处理了 2 台重力仪采集的原始重力数据,对处理后自由空间重力异常数据进行了全面的对比分析,总结得到如下结论:



1) 在相同环境的动态测量条件下,2 台重力仪处理后自由空间重力数据变化趋势一致,两者之间高度线性相关,测量精度相当,动态测量精度优于  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,进而验证了 SAG-2M 型海洋重力仪在本次测量中数据的可靠性。

2) SAG-2M 型海洋重力仪采用石英加速度计传感器,属于捷联惯导式重力仪,本次测试对其工作性能进行了全面检验。通过动态测量及数据比对,该仪器具有平台稳定性高,测量精度高等特点。此项工作为 SAG-2M 型海洋重力仪的研发及测量工作提供了重要的参考依据。

**致谢**:本次比测工作得到了航天十三所的大力协助,李东明博士在数据处理及文章撰写工作中提供了宝贵的意见和技术支持,在此向航天十三所单位领导和技术人员表示诚挚的感谢。

## 参考文献 (References):

- [1] 黄谟涛,翟国君,管铮,等.海洋重力场测定及其应用[M].北京:测绘出版社,2005.  
Huang M T, Zhai G J, Guan Z, et al. Determination and application of marine gravity field[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2005.
- [2] 张训华,赵铁虎,等.海洋地质调查技术[M].北京:海洋出版社,2017.  
Zhang X H, Zhao T H, et al. Survey technologies of marine geology[M]. Beijing: Ocean Press, 2017.
- [3] 李建成,陈俊勇,宁津生,等.地球重力场逼近理论与中国 2000 似大地水准面的确定[M].武汉:武汉大学出版社,2003.  
Li J C, Chen J Y, Ning J S, et al. Theory of the Earth's gravity field approximation and determination of China Quasi-geoid 2000 [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
- [4] 黄谟涛,翟国君,欧阳永忠,等.海洋磁场重力场信息军事应用研究现状与展望[J].海洋测绘,2011,31(1):71-76.  
Huang M T, Zhai G J, Ouyang Y Z, et al. Prospects and development in the military applications of marine gravity and magnetic information[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2011, 31(1):71-76.
- [5] 刘敏,黄谟涛,欧阳永忠,等.海空重力测量及应用技术研究进展与展望(一):目的意义与技术体系[J].海洋测绘,2017,37(2):1-5.  
Liu M, Huang M T, Ouyang Y Z, et al. Development and prospect of air-sea gravity survey and its applications, part I: Objective, significance and technical system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2017, 37(2):1-5.
- [6] 耿启立.重力仪国外代表产品及国内研发最新进展[J].地质装备,2016,17(1):27-30.  
Geng Q L. Representative products of gravity instruments abroad and the latest development of domestic R&D[J]. Geological Equipment, 2016, 17(1):27-30.
- [7] 修睿,郭刚,薛正兵,等.海空重力仪的技术现状及新应用[J].导航与控制,2019,18(1):35-43.  
Xiu R, Guo G, Xue Z B, et al. Technical current situation and new application of marine/ aviation gravimeter[J]. Navigation and Control, 2019, 18(1):35-43.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 12763.8—2007 海洋调查规范第 8 部分:海洋地质地球物理调查.[S].北京:中国标准出版社,2007.  
General Administration of Quality Supervision and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 12763.8—2007 Specifications for oceanographic survey-part 8: Marine geology and geophysics survey.[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [9] 国家海洋局 908 专项办公室.地球物理调查技术规程[S].北京:海洋出版社,2005.  
908 Special Project Office of National Bureau of Oceanography. Specifications for geophysics survey[S]. Beijing: Oceanographic Press, 2005.
- [10] 刘敏,黄谟涛,欧阳永忠,等.海空重力测量及应用技术研究进展与展望(三):数据处理与精度评估技术[J].海洋测绘,2017,37(4):1-10.  
Liu M, Huang M T, Ouyang Y Z, et al. Development and prospect of air-sea gravity survey and its applications, part III: Data processing and precision evaluation[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2017, 37(4):1-10.
- [11] 黄谟涛,刘敏,吴太旗,等.海空重力测量关键技术指标体系论证与评估[J].测绘学报,2018,47(11):1537-1548.  
Huang M T, Liu M, Wu T Q, et al. Research and evaluation on key technological target system for marine and airborne gravity surveys[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(11):1537-1548.
- [12] 欧阳永忠,邓凯亮,陆秀平,等.多型航空重力仪同机测试及其数据分析[J].海洋测绘,2013,33(4):6-11.  
Ouyang Y Z, Deng K L, Lu X P, et al. Tests of Multi-type airborne gravimeters and data analysis[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2013, 33(4):6-11.
- [13] 张向宇,徐行,廖开训,等.多型号海洋重力仪的海上比测结果分析[J].海洋测绘,2015,35(5):71-74,78.  
Zhang X Y, Xu X, Liao K X, et al. Result analysis for different types of gravimeters in sea trials[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2015, 35(5):71-74,78.
- [14] 张振波,赵俊峰,付永涛,等. GT-1M 海洋重力仪与 KSS31M 海洋重力仪的对比[J].海洋科学,2015,39(5):85-91.  
Zhang Z B, Zhao J F, Fu Y T, et al. The Comparison between GT-2M and KSS31M marine gravimeters [J]. Marine Sciences, 2015, 39(5):85-91.
- [15] Kovrizhnykh P, Shagirov B, Geoken, et al. Marine gravity survey at the Caspian with GT-2M, Chekan AM and L&R gravimeters: comparison of accuracy [R]. Russia: Moscow State University, 2011.
- [16] Bodensee Gravimeter Geosystem GMBH. 《Instruction manual for marine gravity meter system KSS 31M》[M], 2004.
- [17] 顾兆峰,张志珣,杨慧良,等.KSS31M 海洋重力仪静态观测结果及分析[J].海洋测绘,2005,25(2):66-68.  
Gu Z F, Zhang Z X, Yang H L, et al. The static measurement re-

sult of KSS31M marine gravimeter and its analysis[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2005,25(2):66-68.

[18] 付永涛,王先超,谢天峰. KSS31M 型海洋重力仪动态性能的分析[J]. 海洋科学,2007,31(6):29-33.

Fu Y T, Wang X C, Xie T F. Verifying the dynamic properties of KSS31M marine gravity-meter by the observed gravity reading and GPS data[J]. Marine Sciences, 2007,31(6):29-33.

[19] 付永涛,王先超,谢天峰. KSS31M 型海洋重力仪在海边静态观测的结果[J]. 地球物理学进展,2007,22(1):308-311.

Fu Y T, Wang X C, Xie T F. The static measurement of KSS31M marine gravity-meter at coast[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(1):308-311.

[20] 欧阳永忠. 海空重力测量数据处理关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2013.

Ouyang Y Z. On key technologies of data processing for air-sea gravity surveys[D]. Wuhan: Wuhan University,2013.

[21] 魏子卿.2000 中国大地坐标系[J]. 大地测量与地球动力学, 2008,28(6):1-5.

Wei Z Q. China geodetic coordinate system 2000 [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008,28(6):1-5.

[22] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京:高等教育出版社, 1979.

Writing Group of 《Mathematical Directory》. Mathematical directory[M]. Beijing: Higher Education Press, 1979.

[23] 於宗俦,鲁林成. 测量平差基础[M]. 北京:测绘出版社,1983.

Yu Z C, Lu L C. Foundation of measurement adjustment [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1983.

The result analysis of the comparison between SAG-2M and KSS31M marine gravimeters

ZHANG Fei-Fei<sup>1,2,3,4,5</sup>, SUN Jian-Wei<sup>1,2</sup>, HAN Bo<sup>1,2</sup>, DU Run-Lin<sup>1,2</sup>, WANG Wan-Yin<sup>3,4,5</sup>

(1.The Key Laboratory of Gas Hydrate,Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 2.Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3.Institute of Gravity and Magnetic Technology,Chang'an University,Xi'an 710054, China; 4.College of Geology Engineering and Geomatics,Chang'an University,Xi'an 710054, China; 5.Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering,Ministry of Education,Chang'an University,Xi'an 710054, China)

**Abstract:** A comparison for the marine gravimeters on the same vessel was carried out between SAG-2M marine gravimeter developed by China and KSS31M marine gravimeter designed by Germany in order to test the technical performance and data reliability of SAG-2M marine gravimeter. The raw gravity data acquired from these two marine gravimeters were preprocessed according to the standards of marine geologic survey to obtain the free air gravity anomalies, and the comparison and relativity for those two types of gravity data were studied by analyzing the cross-point differences, survey lines and grid data. The result shows that the SAG-2M marine gravimeters have the same level of measurement accuracy with the KSS31M marine gravimeter because there is a highly linear relationship between the data from two marine gravimeters with an approximately similar variation trend. Based on the results of comparison, it is concluded that the self-developed SAG-2M marine gravimeter shares the similar standard of measurement accuracy with the KSS31M marine gravimeter with a stabilized technical performance, which provides an important reference for the future application of SAG-2M marine gravimeter.

**Key words:** SAG-2M marine gravimeter; KSS31M marine gravimeter; comparison on the same vessel; technical performance; measurement accuracy

( 本文编辑:王萌)