

航空重力测量系统研究进展

王静波^{1,3}, 熊盛青², 周锡华², 郭志宏²

(1. 中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 3. 北方工业大学 理学院, 北京 100144)

摘要:简要回顾了航空重力测量的发展过程,在介绍了航空重力测量基本原理的基础上,系统地叙述了航空标量重力测量系统的研发历程、研究现状及发展动态。最后,阐述了我国航空重力测量的研究现状和未来的发展方向。

关键词:航空重力仪;航空重力测量;DGPS;惯导系统(INS)

中图分类号: P631.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2009)04-0368-06

航空重力测量的概念最早出现在20世纪50年代末,但是由于受当时重力仪、导航定位设备以及垂直加速度测量精度的影响,当时得到的精度为10 mGal,不能满足实际应用要求。在随后近30年的时间里,尽管对航空重力测量能否达到实用精度一直存在争议,但是人们并没有放弃对其进行研究^[1]。海洋重力测量技术在20世纪六七十年代已经是一种比较成熟的技术,在海洋重力测量技术成熟后的数十年间,航空重力测量一直未能投入实用。20世纪90年代初期至今,航空重力测量技术试验获得成功,并逐步实现了商业化运行。这主要归功于动态差分GPS定位(DGPS)技术的发展,实现了高精度飞机导航定位,使航空重力测量所必需的垂直扰动加速度修正精度和厄特涅斯改正的精度,有可能达到或好于1 mGal的量级,航空重力测量的精度有可能达到或好于1 mGal。从而航空重力测量在地球物理勘探方面得到了广泛应用,服务领域涉及到基础地质研究、石油、天然气及固体矿产资源勘探以及大地测量等方面(图1)。

世界上只有少数几个发达国家能够生产出航空

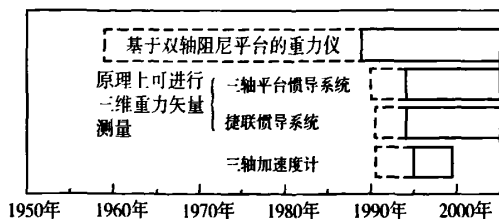


图1 航空重力测量系统的发展历史示意

重力测量系统,并且由于航空重力能够用于军事目的,存在着技术封锁。不管是何种场合,都无法获得航空重力仪的制造技术和相关资料(均为保密)。为了发展我国的航空重力测量事业,必须依赖进口的方式解决国内无航空重力仪的问题。显然,在此基础上,吸收先进技术,自主研发我国的航空重力测量系统具有重大意义。

1 航空重力测量的基本原理

航空重力测量是以飞机作为运载平台,利用航空重力仪在空中测量地球重力场的一种测量方法。根据牛顿第二定律,在惯性坐标系*i*中,质点的动力学方程为:

$$\ddot{\vec{r}}^i = \vec{f}^i + \vec{G}^i,$$

式中: $\ddot{\vec{r}}$ 为质点的惯性加速度; $\vec{G}$ 为引力加速度; $\vec{f}$ 是比力,为重力传感器的观测值。

对于静态重力测量,此时惯性加速度 $\ddot{\vec{r}} = 0$,通过调整可使得重力仪保持水平,从而使重力仪敏感轴对准重力矢量方向,如果不考虑测量误差,则重力仪的观测值就是重力加速度的大小。虽然静态重力测量比较简单,精度却可以很高。对于动态下的航空重力测量,情况就要复杂得多。一方面由于航空重力测量惯性加速度 $\ddot{\vec{r}}$ 不再为零,此时重力传感器的观测值是惯性加速度和引力加速度的共同影响;另一方面重力传感器敏感轴的指向难以保持稳定。因此,原理上航空重力测量需要解决两个基本问题^[2]:①运动状态下如何保持重力传感器的稳定指向或精确地获得重力传感器的指向值?②如何分离出引力加速度和惯性加速度?

按照引力加速度和惯性加速度的分离方法,航空重力测量分为航空重力梯度测量和航空重力测量。①重力梯度测量:将两个共基线的加速度计的输出求差,以其模式消除载体运动加速度 $\dot{v}$ 的影响,如果共用基线是旋转稳定的,则由该差值观测量可得到重力梯度分量。②航空重力测量:采用两个不同的加速度测量系统,其中一个系统的输出含有引力加速度,也就是测量的是比力,而另一个系统输出的是不含引力的加速度,于是在同一个坐标系内对两组加速度输出进行求差,即可消除共有的载体运动加速度。剩下的差值中包含引力加速度和传感器的系统误差。

按照测量对象的不同,又可以将航空重力测量分为航空标量重力测量和航空矢量重力测量。航空标量重力测量只需要测量重力扰动矢量垂直分量的大小(重力异常);航空矢量重力测量需要测量重力扰动矢量所有的三个分量。通常航空重力测量指的就是标量重力测量。

目前国际上航空重力测量、航空重力梯度测量均已进入实用阶段。由于航空重力梯度测量对重力异常的高频分量非常敏感,因此在资源勘探等领域具有广阔的应用前景。但是,航空重力梯度测量技术属西方国家限制出口的尖端技术,技术难度大,短期内难以掌握。因此,笔者着重讨论航空重力标量测量系统的研究进展。

2 国外航空重力测量发展现状

就实用型的航空重力测量系统来说,国际上航空重力测量系统主要为三种类型:两轴阻尼惯性稳定平台型航空重力测量系统、三轴惯性稳定平台型航空重力测量系统和捷联式航空重力测量系统。

2.1 两轴阻尼惯性稳定平台型航空重力测量系统

各国从20世纪30年代开始设计了几十种重力仪。经过几十年的应用,目前广泛使用的重力仪以美国生产的LCR(LaCoste&Romberg)重力仪、Bell重力仪和德国生产的KSS-31重力仪为主。美国LaCoste&Romberg公司从1939年开始制造高精度的重力仪,1955年首次用于海洋重力测量,1958年美国空军测试用该重力仪进行航空测量的可能性,并于1965年生产出了世界上第一台带动态稳定平台的重力仪。1998年12月在法国和瑞士的Alps完成了1万千米的航空重力测量任务^[3],2002年研制出两轴阻尼惯性稳定平台L&R II型海、空重力仪(图2)^[4]。在此基础上对该系统进行了升级,于2005年9月研制出两轴阻尼惯性稳定平台TAGS航空重



图2 L&R II型航空重力仪



图3 TAGS型航空重力仪

力测量系统(图3),并完成了飞行测试,内符合精度达到0.93 mGal,异常半波长分辨率为5.0 km。

LaCoste&Romberg的II、III型海、空重力仪采用零长弹簧原理,漂移小,精度高。该系统工作范围可覆盖全球,包括北极和南极。其GPS主要为重力仪提供高精度的时标为进行同步和数据处理时解算重力场。正如Peters和Brozena所指出的那样^[5],平台稳定性是航空重力测量系统的精度和分辨率进一步提高的主要障碍。

2.2 三轴稳定平台型航空重力测量系统

俄罗斯莫斯科国立技术大学的LIGS(Laboratory of Inertial Geodetic Systems)、加拿大的SGL(Sander Geophysics Ltd.)公司以及俄罗斯莫斯科重力测量技术公司(Gravimetric Technologies Ltd)等研究单位,分别对基于三轴平台惯导系统的航空重力测量系统进行了研究。

从1992年到1998年,LIGS与加拿大Calgary大学合作,对采用三轴平台惯导系统的航空重力测量系统进行了研究和试验。该系统采用俄罗斯生产的航空惯导系统I-21,为了满足重力测量的要求,还专

门设计了一个高灵敏度的加速度计。从 1993 年至 1997 年共进行了约 5 万千米测线的飞行试验,这些试验在不同地区、不同气象条件以及采用不同飞机的条件下进行,试验表明该系统精度可达 1 mGal、分辨率为 3 km^[6]。

1992 年,加拿大 SGL 开始了航空重力测量系统 AIRGrav 的研制,该系统的三轴平台惯导系统包括三个惯性级的加速度计和两个二自由度挠性陀螺,并将惯导系统安装在温控箱里。平台水平姿态可控制在 10 角秒以内,这使得飞机的机动对系统的精度影响很小,并且可以进行起伏飞行。该平台惯导的常平架结构可将每一个加速度计置于垂直的上下两个方向,这使得可经常对加速度计进行标定,同样也可以标定陀螺漂移。1999 年夏天在加拿大渥太华地区进行了首次飞行试验,试验表明重复性精度达到 1 mGal,分辨率为 2.0 km^[7]。

俄罗斯莫斯科重力测量技术公司从 20 世纪 60 年代起就开始制造海洋重力仪。2001 年 9 月,命名为 GT-1A 的航空重力测量系统(图 4)在俄罗斯北部进行了首次试验飞行,之后又在澳大利亚、南非等



图 4 安装在机舱中的 GT-1A 型重力仪

地进行了多次飞行试验。与地面重力测量值相比,该系统精度可达到 0.5 mGal、分辨率 1.5 ~ 2.75 km^[8]。该系统的原理与 AIRGrav 类似,也是采用三轴平台惯导系统结构,同样对加速度计和相关电子设备采取了温控措施。

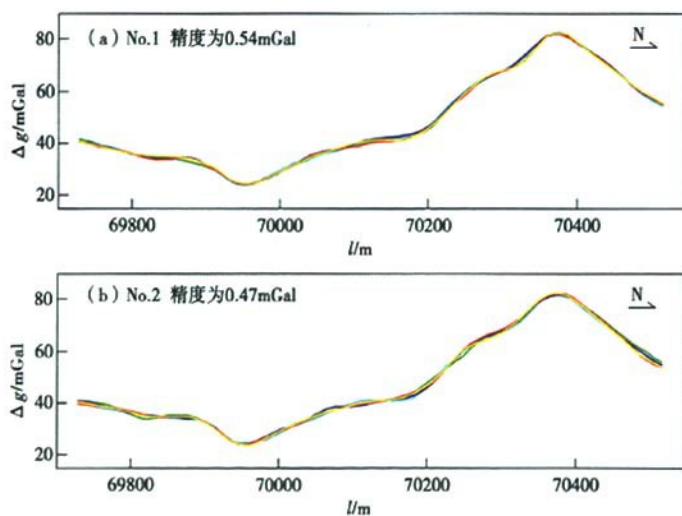


图 5 TAGS 型航空重力仪

图 5 是 No. 1 和 No. 2 号 GT-1A 型重力仪系统 2004 年 3 月和 5 月获得的重复线测试飞行结果,其内符合精度分别达到 0.54 mGal、0.47 mGal。

GT-1A 重力仪稳定平台由两个陀螺仪和两个水平加速度计组成。另一个陀螺仪进行方位控制,第三个加速度计获取垂向加速度的变化。三轴陀螺稳定平台坐标系与 GPS 坐标系一致,因此可使用 GPS 数据对平台进行辅助对准和误差消减,使平台保持水平,其技术比前一种重力仪先进。该系统有采用

数字式阻尼,通过 GPS 的加速度与机内加速度计测到的加速度进行对比,通过 Kalman 滤波产生阻尼,控制平台的稳定,允许工作于较恶劣的天气。工作范围为中、低纬度地区(75°S ~ 75°N)。

目前 AIRGrav 和 GT-1A 这两个系统均已达到商业实用的水平,并已经为多家客户进行了石油、天然气等资源勘探航空重力测量。与海、空重力仪相比,采用三轴平台惯导系统的主要优点是姿态更加稳定,受水平加速度的影响更小^[9]。

2.3 捷联式航空重力测量系统

在 Schwarz K. P. 教授的领导下,加拿大 Calgary 大学率先于 20 世纪 90 年代初开展了基于捷联惯导系统的航空标量重力测量系统 SIGS (strapdown inertial scalar gravimetry) 的研究(图 6)。该系统采用惯性级的 Honeywell LASEREF III 型激光陀螺捷联惯导系统。在 1995 年 6 月、1996 年 9 月和 1998 年 6 月共进行了三次飞行试验^[10-11]。试验结果表明:重复线内符合精度达到 2~3 mGal、分辨率 5~7 km。



图 6 SIGS 捷联式航空重力仪

多家研究机构于 2000 年 4 月和 5 月联合在 Alexandria 地区进行了航空重力测量飞行试验^[12],平均飞行高度为 575 m、速度为 45 m/s。这次试验的目的是综合评估 LCR 重力仪、AIRGrav 和 SIGS 三种航空重力测量系统的性能。在这次实验中,SIGS 的内符合精度为 1.5 mGal、分辨率为 2 km(或者内符合精度为 2.5 mGal、分辨率为 1.4 km),这个精度与 AIRGrav 和采用 LCR 重力仪的航空重力测量系统的精度大致相当^[4]。这些试验表明,采用 SINS 的航空重力测量系统可用于中高分辨率的重力测量^[10]。

从 2001 年开始,在“BMBF-Geotechnologien-Programm”项目的资助下,德国三家科研单位 BEK (Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung)、IfEN (Institut für Erdmessung und Navigation)、IFF (Institute of Flight Guidance and Control) 开展了新型航空重力测量系统的研究^[13],该项目的最终目标是使航空重力测量达到资源勘探的要求,也就是要达到 1 mGal/km 的水平。

三家单位分别采用不同的研究方案,其中 IFF 以俄罗斯产的 CHEKEN-A 双轴平台重力仪为基础,通过添加一个激光陀螺来保持方位稳定,将其改造成平台惯导系统。IfEN 与加拿大 Calgary 大学类似的方案,采用的是法国产的 SAGEM Sigma 30 型激光陀螺捷联系统,并尝试进行矢量重力测量。

BEK 从 20 世纪 90 年代中期就开始研究捷联式

的航空重力测量系统 SAGS(图 7) (Strapdown Airborne Gravimetry System),在最新一代的原型样机 SAGS 4 中包括 3 个光纤陀螺和 4 个高精度 QA3000 (30) 型石英挠性加速度计,并且为了满足航空重力测量的要求从硬件上采取了一些特殊措施,比如温度控制、减震、电磁屏蔽等。



图 7 SAGS4 捷联式航空重力仪

与采用海、空重力仪的系统不一样,采用捷联惯导和平台惯导的系统不仅可以测量重力扰动的垂直分量,而且可以测量重力扰动的水平分量(垂线偏差),也即可以进行航空矢量重力测量。Gleason 和 Jekeli 对基于捷联惯导的航空矢量重力测量进行了大量仿真研究,而后 Jekeli 等人利用加拿大 Calgary 大学的航空重力测量数据进行了航空矢量重力测量研究^[14],研究表明水平分量精度可达到 7~8 mGal,垂直分量的精度为 3 mGal。

3 国内航空重力测量发展现状

由总参西安测绘研究所等单位承担的我国首台航空重力测量系统 CHAGS(chinese airborne gravimetry system)的研究始于 1995 年,他们引进 LCR (LaCoste&Romberg) II 型航空重力仪(L&R126),自行研发了航空重力数据处理软件,并于 2002 年 11 月通过鉴定,历时 7 年^[2,15]。

2002 年 3~4 月 CHAGS 航空重力测量系统采用大型的安-30 飞机在山西大同地区进行了 3 次飞行试验,飞行高度 2 800~3 400 m、飞行速度 400 km/h,测线间距 5~10 km,测定山区平均重力异常的内符合精度为 3.32 mGal,异常半波长分辨率为 10 km。与地面重力测量数据的对比,外符合精度优于 5 mGal。目前该系统已经基本可以满足大地水准面测量等应用的要求,但是还不能达到地质调查、资源勘探等高精度、高分辨应用的要求。

中国国土资源航空物探遥感中心于 2007 年 5

月购置了俄制 GT-1A 型航空重力仪系统,并自主完成了集成工作,形成我国首套用于地球物理勘探的航空重力勘查系统。目前已经完成了试生产,重复线测内符合精度要好于 0.6 mGal,异常半波长分辨率为 3 km(飞行速度 218 km/h)。

GT-1A 的数据采用该系统配套的 GT-1AGavity 航空重力数据处理软件进行数据处理^[16]。该软件包括三部分:①GTNav 模块,综合位置差分法、多普勒频移观测值求解法、差分 GPS 载波相位法(carrier-based accelerations)三种算法的结果解算载体的位置、运动速度和加速度;②GTQC20 模块,通过 GPS 数据中的卫星个数、PDOP 值、坐标位置及速度解算精度来评估 GPS 收录数据的质量,通过重力仪的稳定平台参数、数据饱和状况、零漂情况等评估航空重力数据测量质量;③GTGrav 模块,包括加速度改正、厄特渥斯效应改正、重力基点改正、零漂改正、正常重力场改正、自由空间改正等。在进行改正处理时采用 100 s 全波长窗口宽度的 FIR(finite impulse response)和 Kalman 低通数字滤波压制高频噪声干扰。

到目前为止,国内发展起来的航空重力测量主要依靠的是进口的方式。而用于地球物理勘探的航空重力测量技术还处于起步阶段,许多技术问题亟待解决。最主要的是航空重力仪制造相关技术,难度较大,需国内相关各方协作,争取早日获得突破。此外,也应在航空重力测量的理论和方法上加强研究:主要涉及①由 DGPS 精确地获得载体位置、速度和加速度的方法和技术;②消除或压制航空重力测量数据中高频噪声干扰影响的低通数字滤波、估值技术;③重力加速度和载体运动加速度的分离技术等。这些方法和技术,是下一步获得高精度、高空间分辨率的航空重力测量系统的关键和保证。

4 展望

航空重力测量是在动态环境中进行的,观测数据中存在大量的噪声。传统的航空重力测量系统,采用滤波技术来抑制噪声,提高系统的测量精度。但滤波在压制噪声的同时,必然会造成有用信息的损失。因此,这种系统的测量精度受到一定程度的限制,只能适合中小比例尺的航空重力测量。要想进一步提高航空重力测量系统的精度,需在以下几个方面作出技术改进和创新:①提供性能稳定的测量平台和良好的测量环境;②将激光、超导和量子力学等最新研究成果应用于重力传感器的设计,显著提高航空重力仪的测量精度;③采用重力梯度测量,

从根本上解决由于飞机飞行起伏、发动机噪声带来的问题。如:英国 ARKeX 地球物理公司最新研制的超导航空重力梯度仪(EGG),其测量精度可达 1 E,空间分辨率可达到 100~500 m。由此可见,采用高新技术的航空重力梯度仪是下一代航空重力测量未来的发展方向。

在地质调查和矿产勘探工作中,对于中大比例尺的航空重力测量,可以用 GT-1A 和 AIRGRAV 或性能相当的系统进行测量。而大比例尺的航空重力测量,则需要由 Falcon 和 Air-FTG 或更先进的航空重力梯度测量系统来代替。

近年来,亚洲国家(地区)的航空重力测量有了长足进步。因此,加快发展我国航空重力测量、航空重力梯度测量技术已刻不容缓,并将对资源的勘查、地球科学的研究、国民经济建设产生深远的影响。

参考文献:

- [1] William R G. An Historical Review of Airborne Gravity [J]. The Leading Edge, 1998(1): 113
- [2] 孙中苗. 航空重力测量理论、方法及应用研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2004.
- [3] Kingele E E, Cocard M. The Airborne Gravimetric Survey of Switzerland[R]. Report NR. 31 of the Contribution to the Geology of Switzerland—Geophysical Series. Zurich: Swiss Geophysical Commission, 1996.
- [4] Verdun J, Klingelé E E. Airborne gravimetry using a strapped-down LaCoste and Romberg air/sea gravity meter system: a feasibility study[J]. Geophysical Prospecting, 2005. 53(1): 91.
- [5] Peters M F, Brozena J M. Methods to improve existing shipboard gravimeters for airborne gravimetry [C]//IUGG XXI General Assembly, IAG Symp G4, 1995: 39.
- [6] Salychev O S, Voronov V V. Inertial Navigation Systems in Geodetic Application; LIGS Experience [C]//IN 6th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 1999.
- [7] Ferguson S T, Hammada Y. Experiences with AIRGrav: Results from a New Airborne Gravimeter [C]//In Gravity, Geoid and Geodynamics 2000. Banaf, Canada, 2000.
- [8] Gabell A. The GT-1A mobile gravimeter [C]//ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop, 2004: 55.
- [9] Sinkiewicz J S, Hart D A. A Gyro Stabilized Airborne Gravimetry Platform [J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 1997, 43(2): 123.
- [10] Glennie C L. An Analysis of Airborne Gravity by Strapdown INS/DGPS [D]. Calgary: The University of Calgary, 1999.
- [11] Schwarz K P. Simultaneous Determination of Position and Gravity from INS/DGPS [C]//Univ-Prof Dr-Ing Prof h e Günter Seeber anlässlich seines 65. Geburtstages und der Verabschiedung in den Ruhestand. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover, 2006(258): 141.
- [12] Bruton A M, Hammada Y. A Comparison of Inertial Platform,

- Damped 2-axis Platform and Strapdown Airborne Gravimetry[C]//International Symposium on Kinematic System in Geodesy, Geomatics and Navigation, KIS2001. Canada Banff: The Banff Center, 2001: 542.
- [13] Boedecker G. Airborne Gravimetry: Activities and Achievements 2002 - 2004 [C]//Geotechnologies Status Seminar "Observation of the System Earth from Space", Potsdam, 2004.
- [14] Jekeli C. Airborne Gravimetry Using INS/GPS and Gravity Gradiometers[C]//ION 60th Annual Meeting, 2004: 476.
- [15] 夏哲仁, 石磐, 孙中苗, 等. 航空重力测量系统 CHAGS[J]. 测绘学报, 2004, 33 (3): 216.
- [16] 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.
- [17] 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):
- [18] 熊盛青. "十五"以来我国航空物探进展与展望[J]. 物探与化探, 2007, 31 (6): 479.
- [19] 吴美平, 张开东. 基于捷联惯导系统/差分全球定位系统的航空重力测量技术[J]. 科技导报, 2007, 2 (17): 74.
- [20] 张昌达. 几种新型的航空重力测量系统和航空重力梯度测量系统[J]. 物探与化探, 2005, 29 (6): 471.
- [21] Olesen A V, Forsberg R. Great barrier Reef Airborne gravity Survey (BRAGS99): A Gravity Survey Piggybacked on an Airborne Bathymetry Mission [C]//Gravity, Geoid and Geodynamics 2000. Springer Verlag, 2001: 247.
- [22] Olesen A V, Forsberg R. Airborne Gravity Survey of Lincoln Sea and Wandel Sea[J]. North Greenland Phys Chem Earth, 2000, 25 (2): 25.
- [23] Olesen A V, Tziavos I N. New Airborne Gravity Data Around Crete: First Results From the CAATER Campaign [C]//Gravity and Geoid 2002. Banff Alberta, Canada, 2002.
- [24] Argyle M, Ferguson S. AIRGrav results: a comparison of airborne gravity data with GSC test site data[J]. The Leading Edge, 2000, 19: 1134.
- [25] Sander S, Argyle M. The AIRGrav airborne gravity system [C]//ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop, 2004: 49.

THE ADVANCES IN THE STUDY OF THE AIRBORNE GRAVIMETRY SYSTEM

WANG Jing-bo^{1,3}, XIONG Sheng-qing², ZHOU Xi-hua², GUO Zhi-hong²

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China; 3. College of Sciences, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: This paper gives a brief review of the history of the airborne gravimetry. Based on the principle of the airborne gravimetry, the paper deals emphatically with the history, the present research situation and the developments of the airborne scalar gravity survey system. Further development trends are also indicated.

Key words: airborne gravimeter; airborne gravimetry; DGPS; INS

作者简介: 王静波(1963-), 男, 中国地质大学(北京)在读博士研究生, 北方工业大学理学院讲师。

上接 367 页

GARVITY-MAGNETIC-SEISMIC INVERSION AND INTEGRATED INTERPRETATION OF A TYPICAL SECTION IN SOUTH YELLOW SEA

LIN Zhen, YAO Yong-jian

(Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: Based on aeromagnetic data combined with other geological information, the authors chose a typical and representative section in south Yellow Sea to perform gravity-magnetic-seismic inversion and integrated geological-geophysical interpretation and analyze magnetic basement property, lithofacies structure and fault structure characteristics. The results obtained provide a basis for further oil and gas exploration.

Key words: south Yellow Sea basin; features of geophysical field; joint inversion of gravimetric and magnetic and seismic data

作者简介: 林珍(1968年), 女, 物探高级工程师。1991年毕业于中国地质大学(武汉), 勘查地球物理专业, 主要从事海洋重、磁资料的解释与研究工作。