

几种新型的航空重力测量系统和 航空重力梯度测量系统

张 昌 达

(中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:较详细地描述了2个航空重力测量系统:一个系统由俄罗斯科学家设计、制造并进行飞行试验,命名为GT-1A;另一个系统由加拿大山德尔地球物理公司研制,命名为AIRGrav。这2个系统都利用惯性稳定平台,适用于地质调查和普查油气和其他矿产。此外,简略地评论了航空重力梯度测量系统,如Falcon, AirFTG, GEDEXTM和ARKeX-EGGTM。

关键词:航空重力;GT-1A;AIRGrav;Falcon;AirFTG

中图分类号: P631.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2005)06-0471-06

在世纪之交的10多年里,由于采用卫星定位、惯性导航、超导以及计算等先进的科学与技术,航空重力测量和航空重力梯度测量技术发展特别迅速,取得了长足的进步。

笔者最近撰写了一篇文章,题目是:“航空重力测量和航空重力梯度测量问题”^[1],由于篇幅的限制,对于每一种重力仪和重力梯度仪只作了简单的说明。笔者在本文中 will 比较详细地阐述几种新型的重力仪和重力梯度仪——AIRGrav、GT-1A、GEDEX和ARKeX,它们在技术上十分先进,有广阔的应用前景,对于地质调查、油气资源和矿产资源的普查勘探十分重要,希望引起同行们的关注。

航空重力测量技术可分为航空标量重力测量、航空矢量重力测量和航空重力梯度测量。根据重力传感器不同的定向方法,标量重力测量系统可分为4类:①基于阻尼二轴平台的航空重力仪,以LaCoste & Romberg航空和海洋重力仪为代表,这是目前常用的航空重力仪,我国的航空重力测量系统CHAGS也采用这种重力仪;②基于舒勒调谐平台(Schuler-tuned platform)或惯性平台的航空重力仪,20世纪90年代末研制成功,已有2个型号(AIRGrav、GT-1A)投入商业飞行,适用于地质调查和探矿;③捷联式(Strapdown)航空重力测量系统;④加速度计三单元组(triad of accelerometers)。②、③、④都是新型的航空重力测量系统,性能相当好,重量轻,功耗小,价格低,使用方便。我们应该注意研究这些新型的航空重力测量系统的发展动态,特别是

关于惯性平台航空重力仪和捷联式航空重力测量系统的发展动态。

由于差分GPS的发明,为确定飞机的速度提供有效而廉价的手段,是确定飞机垂直加速度以及Eötvös和Coriolis效应的关键。GPS技术进步了,航空重力系统的精确度与分辨力也就提高了。

在21世纪元年,即2001年,有报道说,利用经过改装的LaCoste & Romberg重力仪进行航空重力测量,可得到十分之几mGal(sub-mGal)的准确度和大约6km的空间分辨力。航空重力主要应用油气普查中圈定盆地,用在地面和海上重力测量不能开展的地方。

只测定垂直方向上重力的INS DGPS航空重力仪的最新发展,使航空重力系统的准确度分辨力有了很大的提高,因而打开了新的应用领域。现在航空重力测量可以全面用于大、中、小比例尺的地质调查和矿产普查工作中,甚至可以取代地面重力测量。

关于航空重力测量系统研究和开发的历史和现状,Alexander Mark Bruton在他的博士论文中有详尽的阐述^[2]。

1 基于舒勒调谐平台的航空重力仪

20世纪90年代,俄罗斯莫斯科的惯性技术中心(Inertial Technology Center, ITC)与加拿大卡尔加里大学(University of Calgary)和卡尔加里的Canagrav Research Ltd公司合作,最先试验了一种惯性平台系统,而且ITC接着开发出航空重力测量系统。

ГТС 的首席科学家 О. С. 萨里切夫 (О. С. Сальчев) 教授, 现在是莫斯科国立技术大学惯性大地测量系统实验室 (Laboratory of Inertial Geodetic Systems, ЛIGС; Лаборатория Инерциальных Геодезических Систем, ЛИГС) 主任, 加拿大卡尔加里大学空间信息工程系 (University of Calgary, Department of Geomatics Engineering) 教授^[3]。

俄罗斯的另外 2 个单位也研究开发了新型的航空重力仪, 并投入实际应用。俄罗斯的重力测量技术科技公司 (Scientific and Technological Company Gravimetric Technologies) 和国立莫斯科大学数学力学系 (开发软件) 合作研制成惯性平台的航空重力仪 GT-1A。Gravimetric Technologies 从 20 世纪 60 年代起就制造海洋重力仪, 2000 年澳大利亚世界地球科学公司 (World Geoscience Ltd) 要求 Gravimetric Technologies 将他们的重力仪改造成航空重力仪。处理软件是莫斯科大学数学-力学系导航实验室主任尼古拉·帕茹什尼科夫教授开发的。帕茹什尼科夫教授 (Н. А. Парусников, N. A. Parusnikov) 和他的研究小组从 20 世纪 90 年代早期就参与了一个研制航空重力仪的项目。命名为 GT-1A 的航空重力测量系统于 2001 年 9 月在俄罗斯北部进行试验飞行。由 2 条 100 km 重复测线数据得到均方根误差为 0.53 mGal。1995 年, 俄罗斯总统叶里钦曾授予该公司总工程师斯莫勒尔 (Ю. Л. Смоллер) 和首席科学家尤里斯特 (С. Ш. Юрист) 最高科技奖, 表彰他们为运动重力测量技术作出的贡献^[4]。

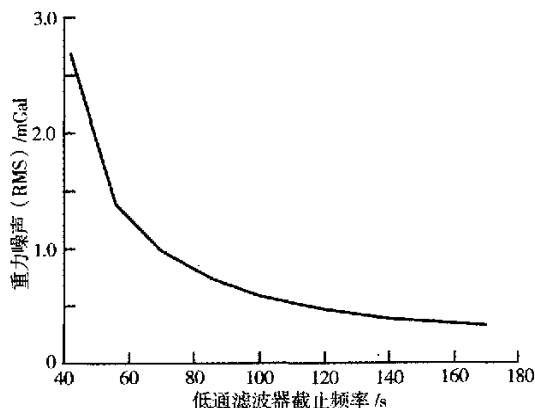
同时, 1992 年, 加拿大山德尔地球物理公司 (Sander Geophysics Limited) 执行一项设计制造航空重力仪的计划, 航空重力仪要适应飞机的动力学环境。经过 5 年的研究和开发, 制成了与 GT-1A 在原理上相同的航空重力仪, 命名为 AIRGrav (airborne inertially referenced gravimeter, 航空惯性参考重力仪), 于 1997 年投入商业飞行。

惯性稳定平台系统的 GT-1A 和 AIRGrav, 利用加速度计取代 LaCoste & Romberg 重力仪, 可较精确地追踪并通过处理, 消除飞机垂直加速度的作用, 因而不受空气湍流的影响, 可作起伏飞行, 可以得到中等和高的空间分辨力, 发现幅度高于 0.5 ~ 1.5 mGal、一定宽度的重力异常, 适合于执行地质调查、油气和某些矿产的普查任务。

2 AIRGrav

AIRGrav 系统的核心是一个三轴回转仪稳定的惯性平台, 其中装有 3 个互相垂直的加速度计, 而不

用传统的弹簧型重力仪。惯性平台保证重力仪保持垂直, 不论飞机运动状态如何, 水平误差在 10 rad/s (0.002 8°) 之内。AIRGrav 系统控制回路中使用的高精度的陀螺仪, 漂移很小, 平台用舒勒 (Schuler) 调谐到 84 min 的周期, 因而在加速时不会倾斜。如上所述, AIRGrav 使用的重力传感器是一个非常精密的三轴加速度计。它的动态范围很宽, 当飞机垂直运动剧烈时, 不会饱和 (超格), 因此允许飞机按地形做起伏飞行, 并且可以在类似于高精度航空磁测遇到的湍流情况下进行的调查飞行。利用低通滤波器处理重力数据, 得到最终结果。滤波器的带宽与重力异常准确度 (或噪声水平) 和分辨力密切相关, 因为信噪比与带宽的平方根成反比。对大量 AIRGrav 飞行数据进行分析研究以确定系统的性能。图 1 表示重力噪声水平 (均方根值 RMS) 与滤波器长度 (20 s 相当于 1 km) 的关系。所谓滤波器长度, 是滤波器截止频率的另一种说法。曲线显示, 噪声水平随着滤波器长度增加而急剧降低, 表示噪声集中于高频段。



以频率的倒数表示低通滤波器的截止频率

图 1 重力噪声与滤波器长度关系曲线 (引自文献[6])

AIRGrav 系统重量小于 100 kg, 可以与其他地球物理仪器 (如磁力仪) 装在一架飞机上进行调查飞行。AIRGrav 系统曾装在双引擎的 twin engine Cessna 404 Britten-Norman Islanders、单引擎的 Cessna 208B Grand Caravans, 以及 Eurocopter AS 350 直升机上进行探测飞行。这套系统曾在各种地理、气候条件下进行工作。表 1 列出 AIRGrav 代表性的参数, 可见重力数据的准确度和分辨力、飞机或直升机的速度和测线间距之间的关系。AIRGrav 系统的噪声标准偏差为 0.2 mGal (表 1 中写为准确度), 使用飞机或直升机, 空间分辨力分别为 2.2 ~ 4 km 或 0.7 ~ 1.1 km。通过加密测线或重复飞行的方法, 可进一步提高准确度和空间分辨力。据山德尔地球物

表 1 AIRGrav 代表性参数

准确度 RMS mGal	分辨率 1/2 波长 m	飞机或 直升机	速度 节	线距 m	生产效率 (km ² /d)
0.2	4000	飞机	120	1000	500
0.2	2200	飞机	95	300	150
0.2	1100	直升机	50	200	100
0.2	700	直升机	35	50 ~ 100	30

注:引自文献[6]

理公司一位负责人说,使用 AIRGrav 系统作航空重力测量的费用大约为 40 ~ 60 美国/测线公里,该公司已制造出 4 套航空惯性参考重力仪^[5-6]。

3 GT-1A

3.1 结构和性能

GT-1A 是一台航空 GPS-INS(全球定位系统-惯性系统)标量重力仪,有一个垂直重力传感器,安放在一个舒勒调谐的(Schuler-tuned)三轴惯性平台中。GT-1A 由 3 个基本部分组成(图 2):

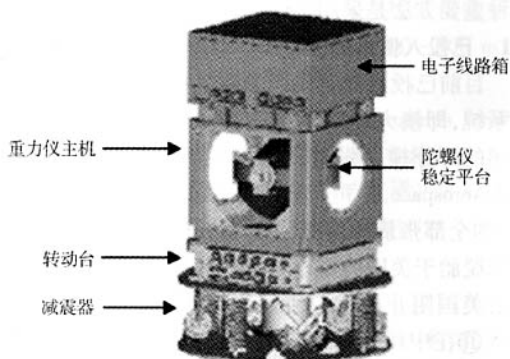


图 2 GT-1A 航空重力仪(引自文献[7])

中间部分是重力仪本身,重 50 kg,4 个侧面的外盖已打开。重力仪主机安放在转动台上,主机之上是电子线路箱,平面上的尺寸是 40 cm × 40 cm,高 70 cm。这 3 个部件安装在减震器上,减震器是一个圆形装置,有 4 个主弹簧,8 个阻尼器,截止频率为 5 Hz。减震器直径 60 cm,高 20 cm,整个重力仪高 92 cm。惯性平台(陀螺仪稳定平台)使重力传感器保持垂直,而旋转台则保持平台的方位不变。

垂直加速度计或重力灵敏元件(gravity sensing element, GSE)具有轴向结构,有一个检验质量悬挂在弹簧上,一个光电位置检拾器和一个活动线圈作用力反馈传感器。GSE 悬挂的设计使交叉耦合效应降低到最小,这种效应起源于由飞机运动引起的水平加速度,水平加速度影响重力测量。这种设计使得 GT-1A 可以在水平加速度很大的条件下(如飞机转弯和有强烈湍流时)进行重力测量。GSE 带宽为 100 Hz,安装在陀螺仪稳定的平台上,平台包含一个双轴常平架,见图 3。平台还有 2 个水平加速度计,一个具有垂直动量矩的动力学调谐陀螺,一个用于控制方位的光纤陀螺(fibre optic gyro, FOG)以及 2 个重力仪标定装置(gravimeter calibration devices, GCD)。GCD 用倾斜的方法标定重力仪,无需卸开 GSE。图上显示 GSE 倾斜 45°,45°是飞机横滚和俯仰的极限角度。

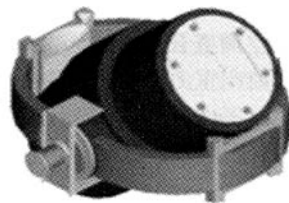


图 3 GT-1 平台(其中 GSE 倾斜 45°。引自文献[7])

用光纤陀螺、倾斜仪、角度传感器和双频 GPS 的信号来驱动(一些)伺服马达。这些马达使传感器保持在垂直位置,实际上是消除水平加速度对测得的信号的影响。整个重力仪安装在一个旋转台上,使传感器指向同一方向。重力数据以大约 18 Hz 的频率取样,以 2 Hz 的频率二次取样(sub-sampled),与双频 DGPS 数据结合起来消除飞机垂直加速度和 Eötvös 效应的影响。利用非平稳自适应 Kalman 滤波器处理重力资料(原始重力数据、飞机垂直速度(DGPS 相位信息)、平台未对准误差),得到最终结果。滤波器长度(截止频率)由客户根据分辨率要求确定。

电子线路箱内有一个微处理器,输入、输出界面,次级电源等。同时在 ±250 Gal(0.25 g)和 ±500 Gal(0.50 g)动态范围内(测程)进行测量和记录。

通过利用不同截止频率的滤波器,可以获得不同的空间分辨力。根据飞机的地速、飞行条件和目标的大小来选择滤波器。滤波器长度可以 60 ~ 110 s 或更长,当地速为 50 m/s 时,相应的半波长分辨力为 1.5 km 和 2.75 km。当直升机地速为 25 km 时,滤波器长度由 60 s 和 110 s,相应的半波长分辨力为 0.75 km 和 1.4 km。根据重复飞行数据计算,噪声标准偏差约为 0.5 mGal。

GT-1A 的主要特点可归结为:GT-1A 航空重力仪体现现代化的设计和全自动的操作。智能型的平台控制结合 2 个动态范围的连续记录使系统能够在强烈湍流条件下获取高质量的数据;GT-1A 重力仪是全自动的系统,在获取数据时,飞机上不需要操作人员。飞机驾驶员看指示灯可了解数据质量;GT-1A

功耗低(直流:27 V×5 A),体积小,结构紧凑坚固,可在各种飞行条件下获取高质量的数据,这种重力仪几乎满足任何航空重力测量的要求^[7-8]。

3.2 应用

有关方面签订协议,俄罗斯重力测量技术公司(Гравиметрические Технологии, Gravimetric Technologies Ltd)制造的 GT-1A(以及海洋重力仪 GT-1M),由加拿大麦克罗(微)重力公司(Canadian Micro Gravity (Pty) Ltd, CMG)在世界范围内经营、销售。

福格罗航空调查公司(Fugro Airborne Surveys (PTY) Ltd)在航空重力测量工作中一直采用拉科斯特-龙贝格(LaCoste and Romberg)重力仪,经过试验之后,该公司决定在商业重力调查中优先采用 GT-1A。

麦克法尔地学调查公司(McPHAR Geosurveys Ltd)表示要在该公司所有的调查工作中使用加拿大麦克罗(微)重力公司提供的 GT-1A 航空重力仪。

加拿大麦克罗(微)重力公司(Canadian Micro Gravity)和美国贝耳地球空间公司(Bell Geospace)宣布他们将紧密合作。两公司的技术高度互补, Bell Geospace 公司的 Air-FTG 提供高空间分辨力的全张量重力梯度数据,而 CMG 的 GT-1A 则提供区域规模的总场重力数据。

以上介绍了加拿大的 AIRGrav 和俄罗斯的 GT-1A 航空重力测量系统。现在我们讨论这 2 个系统所得结果与地面重力测量结果的对比问题。

加拿大山德尔地球物理公司(Sander Geophysics Limited, SGL)最近在加拿大的 Timmins 地区和一个老油田(Oil Field)地区用 AIRGrav 进行航空重力测量,这些地区有较详细的地面重力测量数据,因此可以将航空与地面数据(有 4 000 多个)进行对比。通过数据的统计分析、航空与地面重力异常图的对比, SGL 认为“SGL 的 AIRGrav 系统可以用来补充或代替地面重力测量”(见 Sander geophysics, recent results from SGL's airborne gravity surveys, October, 2003, <http://www.sgl.com/papers.htm> 或 [6])。

2004 年 3 月福格罗航空调查公司(Fugro Airborne Surveys)的 Adam Wooldridge 在南非约翰内斯堡附近的 Vredefort 穹窿(Vredefort Dome)上用 GT-1A 进行飞行试验,包括详查(2 km×22 km, 3 600 测线公里)和区域调查(12 km×42 km, 1 700 测线公里),绘制了详查区航空重力与地面重力异常图,以及包括详查区在内的区域调查范围的航空重力与地面重力 2 种异常图。从重复测量结果以及 2 种图的对比, Adam Wooldridge 认为, GT-1A 性能优良, 而且

航空与地面“2 个数据组之间的相关性,对于高频和低频特征来说,都是极好的”^[9]。

笔者审视了有关插图和统计分析结果,有一些初步的看法。在地质调查和矿产勘查工作中,对于中、小比例尺的航空重力测量,可以用 AIRGrav 和 GT-1A 或性能相当的系统进行航空重力测量,代替(或互为补充)地面重力测量,迅速、有效地完成区域重力测量任务。从 1: 2 万到 1: 20 万均可,对于更小的比例尺,要使用大型的飞机。对于大比例尺的航空重力测量,则应由 FALCON®和 Air-FTG™或更先进的航空重力梯度测量来代替(或互为补充)地面重力测量。下面就介绍航空重力梯度测量。

4 关于航空重力梯度测量

航空重力测量技术的精度和空间分辨力虽然有很大的提高,但是还不能完全满足勘探地球物理学的要求,提高航空重力数据的精度和空间分辨力的一种重要方法是采用梯度测量方式。

4.1 已投入使用的 FALCON®和 Air-FTG™

目前已投入商业飞行的有 2 种航空重力梯度测量系统,即澳大利亚 BHP Billiton Innovation Pty Ltd 公司的部分梯度张量测量系统 FALCON®和美国 Bell Aerospace 公司(现已并入 Lockheed Martin 公司)的全部张量梯度测量系统 Air-FTG™,这 2 种系统都脱胎于美国的军事技术,是美国出口管制产品,最近美国阻止澳大利亚 BHP Billiton 公司用 FALCON®在中国进行探矿飞行。FALCON 重力梯度项目曾经获得澳大利亚联邦科学和工业研究组织(CSIRO)2000 年度科学研究成果奖。这 2 种航空重力梯度仪的精度约为 5~10 E(厄缶用 E 表示,在有的文献中记作 E₀ 或 E_{0t}, $1\text{ E} = 1 \times 10^{-9}/\text{s}^2 = 1\text{ mGal}/(10\text{ km}) = 0.1\text{ Gal}/\text{m} = 1\text{ nm}/(\text{s}^2/\text{m})$),空间分辨力约为 0.5~1 km^[10-11]。

4.2 即将投入使用的 2 种航空重力梯度测量系统

正在研究、开发,即将投入使用的,还有另外 2 种航空重力梯度测量系统。

加拿大 GEDEX 公司采用西澳大利亚大学研制的 AGG-OQR 重力梯度仪(航空超导“剪刀”状重力梯度传感器),安装在一个运动隔离器 GeoMIM 上, GeoMIM 是一个具有超静性能的平台,使重力梯度仪在空中中等湍流条件下也能工作,达到 1 E/Hz^{1/2} 的设计性能水平。在 GeoMIM 上还装有一台重力仪,重力仪采用 Honeywell Q-Flex 型加速度计,经过在俄罗斯和平号空间站和美国航天飞机上长期试验,这种加速度计可以测量 $1\text{ }\mu\text{m}/\text{s}^2$ 安装在飞机的

GeoMIM 上,预期在取样率为 1 Hz 时,可达到优于毫伽级的 (sub-milliGal) 观测水平。整个系统注册为 GEDEX™,预计在 2005 年开始进行试验飞行^[12-13]。

英国 ARKeX 是由著名的英国牛津仪器公司和另一家地球物理公司的一些人员新组成的公司。牛津仪器公司为欧洲航天局设计制造超导重力梯度仪,但未按期完成任务,因而未能用在卫星上,不过该局继续资助这个项目。ARKeX 正在改装超导重力梯度仪,准备用于航空重力梯度测量。卫星的飞行很平稳,而飞机的加速度很大,目前 ARKeX 正在努力研究克服飞机干扰的办法,并将超导重力梯度仪注册为 EGG™,EGG 是勘探型重力梯度仪 (Exploration Gravity Gradiometer) 的缩写,EGG™ 的特点是采用 SQUID (超导量子干涉装置) 测量加速度计检测质量 (proof mass) 极其微小的位移,上述 AGG-OQR 重力梯度仪也采用 SQUID。ARKeX 计划将 EGG™ 在 2006 年投入商业飞行^[14-15]。

如果试飞成功,这 2 种超导重力梯度仪的精度可能达到 1 E,空间分辨力可能达到 100 ~ 500 m,将比 FALCON® 和 Air-FTG™ 前进一大步。

另外还有新西兰的 Gravitec Instruments Limited 公司 (研究开发莫斯科大学物理系 A. B. Веряскин 教授提出的方案),美国 NASA 的喷气推进实验室等单位正在积极研究开发新型的重力梯度仪^[16-17]。

5 讨论

笔者长期从事勘探地球物理的教学、科学研究、普查探矿工作,由于工作经历的关系,对于航空地球物理方法十分关心。2002 年,中国第一套航空重力测量系统 CHAGS 问世,笔者深受鼓舞。CHAGS 由 Lacoste & Romberg (L&R) 126 型重力仪、GPS 接收机、高度传感器等部件组成,试验飞行用大型的安-30 飞机执行航测,飞行高度 2 800 ~ 3 400 m (地面以上),飞行速度 400 km/h,测线间距 5 ~ 10 km,准确度 4.2 mGal,空间分辨力 8 km。这个系统适用于大地测量工作^[18-19]。

对于地质调查和矿产普查工作来说,要求航空重力测量系统能获得准确度和空间分辨力很高的结果,这就要求使用轻型飞机,飞行高度低,飞行速度低,要求使用精度更高的重力仪,高精度地测定飞机的位置、速度和加速度,使用无线电测高仪或激光测高仪精确地测绘地形等等。我国目前还没有适用于地质调查和矿产普查工作的航空重力测量系统。

笔者获悉,国内有一个单位曾与荷兰 Fugro 公司洽谈航空重力问题。在航空重力测量工作中,万方数据

Fugro 使用升级为 ZLS UltraSys™ 系统的 Lacoste & Romberg (L&R) 动态重力仪,ZLS 型重力仪采用数字控制,并经过验证,还采用新式的空气阻尼器,以降低交叉耦合效应。工作中可使用多种型号的轻型飞机。Fugro 已进行了大量的航空地球物理工作,其中航空重力测量为 80 000 测线公里。准确度约为 0.6 mGals,空间分辨力 (半波长) 为 6 km,空间分辨力稍差。与 Fugro 公司合作是一个可行的选择。

笔者还获悉,关于 2005 年我国基础地质调查工作,有关部门要求“…积极开展航空重力测量系统的引进工作。”根据调查研究的结果 (见 [1] 和本文),笔者认为,租用或引进 (购买) AIRGrav 或 GT-1A 是可能的、合理的和适用的。不过,即使能够租用或引进 (购买),对于我国这样一个领土、领海如此广袤的国家,也应自己掌握航空重力测量和航空重力梯度测量技术。如果组织跨学科、跨部门的协作,自主研制基于舒勒调谐平台的航空重力仪,在不长的时间内,可能取得成功。至于航空重力梯度测量系统,美国既然阻止中国租用 FALCON® (当然也会阻止中国租用 Air-FTG™),肯定更不会同意将 FALCON® 或 Air-FTG™ 卖给中国。不租、不卖也好,因为这 2 个系统即将被更先进的系统 GEDEX™ 和 EGG™ 所取代。我们似乎应该考虑是否有可能自主研制航空超导重力梯度测量系统的问题。

参考文献:

- [1] 张昌达. 航空重力测量和航空重力梯度测量问题 [J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(4).
- [2] Bruton A M. Improving the Accuracy and Resolution of SINS/DGPS Airborne Gravimetry [EB/OL]. PhD thesis, University of Calgary, Calgary, Alberta, <http://www.geomatics.ucalgary.ca/GradTheses.html>, 2000.
- [3] The Russian Gravity Group (RGG). 5 Years of the airborne gravimetry project (1993 - 1998) (Brochure) [EB/OL]. Moscow: photography and page making by Vladimir Voronov, <http://lgs.ru/rus/index.html>, 1998.
- [4] Смоллер Ю Л, Юрист С Ш, Парусников Н А, и др. Инерциально-гравиметрический комплекс МАГ-1 (СТ-1А): Опыт разработки и результаты летных испытаний [J]. Гиропскопия и навигация, 2002, 38 (3): 104 - 116.
- [5] Sander S, Argyle M, Elieff S, et al. The AIRGrav airborne gravity system [A]. In: Lane R J L. Airborne gravity 2004—Abstracts from the ASEG-PESA airborne gravity 2004 workshop: Geoscience australia record [C]. 2004, 18: 49 - 54.
- [6] AIRGrav Airborne Gravity [EB/OL]. <http://www.sgl.com/gravity.htm>.
- [7] GT-1 Technical Description [EB/OL]. http://canadianmicrogravity.com/technical_description.htm.

- [8] Gabell A, Tuckett H, Olson Daniel. The GT-1A mobile gravimeter [A]. In: Lane R J L. Airborne Gravity 2004—Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop; Geoscience Australia Record[C]. 2004, 18:55-62.
- [9] Adam Wooldridge (Fugro Airborne Surveys). GT-1A Airborne Gravity, A case history over the Vredefort Dome, South Africa [M]. Presented at ASEG Airborne Gravity Workshop, 2004.
- [10] Dransfield M H, Lee J B. The FALCON airborne gravity gradiometer survey systems[A]. In: Lane R J L. Airborne Gravity 2004—Abstracts from the ASEG - PESA Airborne Gravity 2004 Workshop; Geoscience Australia Record[C]. 2004, 18:15-20.
- [11] Murphy C A. The Air-FTG™ airborne gravity gradiometer system [A]. In: Lane R J L. Airborne Gravity 2004—Abstracts from the ASEG - PESA Airborne Gravity 2004 Workshop; Geoscience Australia Record[C]. 2004, 18:7-14.
- [12] Tryggvason B, Main B, French B. A high resolution airborne gravimeter and airborne gravity gradiometer[A]. In: Lane R J L. Airborne Gravity 2004—Abstracts from the ASEG - PESA Airborne Gravity 2004 Workshop; Geoscience Australia Record [C]. 2004, 18:41-48.
- [13] Catalyst for Discovery[EB/OL]. <http://www.gedex.ca/index.html>.
- [14] Lumley J M, White J P, Barnes G, et al. A superconducting gravity gradiometer tool for exploration [A]. In: Lane R J L. Airborne Gravity 2004—Abstracts from the ASEG - PESA Airborne Gravity 2004 Workshop; Geoscience Australia Record[C]. 2004, 18:21-40.
- [15] EAGE. ARKeX on the way to hatching an EGG, First Break, 2004, 22(November):65-69.
- [16] Alexey V Veryaskin (Веряский Алексей Владимирович). A novel combined gravity & magnetic gradiometer system for mobile applications[A]. presented at the SEG International Exposition and 70th Annual Meeting, SEG 2000[C]. Calgary, Canada, 2000, August, 6-11.
- [17] Yu N, Maleki L, et al. Quantum Gravity Gradiometer Sensor for Earth Science Application[R]. JPL, 2003.
- [18] 孙中苗, 夏哲仁, 石磐. 航空重力测量研究进展[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3):492-496.
- [19] 北斗星通网站. 航空重力测量系统[EB/OL]. <http://www.navchina.com/gps/w24.asp>.

SEVERAL NEW TYPES OF AIRBORNE GRAVIMETRIC SYSTEMS AND AIRBORNE GRAVITY GRADIOMETRIC SYSTEMS

ZHANG Chang-da

(Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper describes in detail two series of airborne gravimetric systems, namely airborne gravimetric systems (also called GT-1A) designed, manufactured and tested by Russian scientists, and AIRGrav developed by Canadian Sander Geophysics Limited. These two series of systems, using inertially stabilized platform, are suitable for geological survey and prospecting of oil/gas and minerals. Besides, some airborne gravity gradiometric systems such as Falcon, AirFTG, GEDEXTM and ARKeX-EGGTM are reviewed in brief.

Key words: airborne gravity; GT-1A; AIRGrav; Falcon; AirFTG

作者简介: 张昌达(1933-),男,武汉市人,教授。1954年毕业于吉林大学物理系,1955年毕业于长春地质学院物探系研究生班。目前正致力于物探新方法研究,已发表论文40余篇。