

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

吴美平, 张开东

国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073

[摘要] 地球重力场资源对促进大地测量学、空间科学、地球物理学、地球动力学、海洋学、资源勘探以及现代军事学的发展具有重要作用。在阐述了航空重力测量基本原理基础上,详细分析了基于捷联惯导系统的航空重力测量原理及其关键技术,以及我国航空重力测量技术发展的技术基础。

[关键词] 航空重力测量;捷联惯导系统(SINS);差分全球定位系统(DGPS);关键技术

[中图分类号] P223⁺.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)17-0074-07

Technology of Airborne Gravimetry Based on SINS/DGPS

WU Meiping, ZHANG Kaidong

Mechatronics and Automation School, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract: The gravity field resource of the Earth is very important to the advancement of geodesy, space science, geophysics, geodynamics, oceanography, resource exploration and modern military science. With an introduction to the theory of airborne gravimetry, the principle and key technologies of airborne gravimetry based on strapdown inertial navigation system are reviewed, and the technological basis of airborne gravimetry in China is specially addressed.

Key Words: airborne gravimetry; SINS(Strapdown Inertial Navigation); DGPS(Differential Global Position System); key technology

CLC Number: P223⁺.4

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)17-0074-07

0 引言

地球重力场是地球的一种基本物理场。地球重力场的确定对大地测量学、空间科学、地球物理学、地球动力学、海洋科学、资源勘探以及现代军事等学科具有重要意义^[1-3]。

按照重力测量物理量的不同,重力测量可分为绝对重力测量和相对重力测量,其中,绝对重力测量测的是重力的绝对数值,相对重力测量测的是某点相对另一重力基准点的重力差值。绝对重力仪的原理主要是基于自由落体运动,精度可达到 μGal ($1 \mu\text{Gal}=10^{-8} \text{ m/s}^2$) 级。绝对重力测量主要用于建立高精度的重力基准网、监测地球动力学现象、环境变化及地震和火山等引起的重力场效应。与绝对重力测量相比,实施相对重力测量就简便易行些,更适合于大范围的重力测量,但是其精

度要低于绝对重力测量。目前地球重力场的测量手段有地面重力测量、海洋重力测量、航空重力测量以及卫星重力测量等。

传统的静态地面重力测量虽然可以获得地球重力场的高频分量,但是需要作业人员逐点测量,因此是个费时又艰苦的工作,而且在深山、密林、沙漠等人烟难及地区难以实施。海洋重力测量是一种低动态的重力测量方法,是近 20 年来采集海洋局部重力数据的主要方法,其特点是载体运动速度低且在一个平均海面上,因此仅靠测量系统硬件方面的阻尼和低滤波技术就可达到要求的精度^[2],但对于大面积的陆地重力测量却无能为力。卫星重力测量技术提供了一种可覆盖全球的高效率的重力测量手段。目前国际上正在进行和即将开展的多项卫星重力测量计划,如 CHAMP, GRACE,

收稿日期: 2007-07-09

作者简介: 吴美平,湖南长沙国防科学技术大学机电工程与自动化学院,副教授,研究方向为飞行器导航制导与控制技术;

E-mail: meipingwu@263.net

GOCE, 可使重力场的精度达到几个 mGal、分辨率达到 100 km^[4]。虽然卫星重力测量可以提供全球重力场信息, 但是在中高分辨率重力场测量中无能为力, 提供的重力场信息不能满足资源勘探、地球物理研究等领域的要求。

航空重力测量是以飞机为载体确定区域和局部重力场的方法, 由于其测量速度快、范围广、成本低, 且几乎可到达任何地区, 因此可快速、连续、精确地测量大面积的地球重力场。航空重力测量技术在 20 世纪 50 年代末已出现, 但直到 20 世纪 80 年代末 90 年代初, 随着 GPS 动态定位技术及航空用重力仪的逐渐成熟, 航空重力测量技术才得到迅速发展, 成为在区域范围内获取高精度、中高分辨率重力场信息的有效手段, 且可以覆盖卫星重力测量和地面重力测量之间的频带。美国、加拿大、俄罗斯、德国、丹麦、瑞士、日本等国先后开展了航空重力测量技术研究, 并进行了大量飞行试验。试验结果表明, 航空重力测量已进入实用阶段。但是, 为了满足资源勘探、地球物理研究等高精度应用的要求, 进一步提高测量精度和分辨率仍然是当前航空重力测量技术的重要任务。

我国对航空重力测量技术的研究起步较晚, 已取得的成果目前还很难满足高精度应用的需要。我国从 1974 年开始了全国规模的重力测量、地球形状及重力场的研究工作。但是, 由于我国幅员辽阔、地形极其复杂, 因此全面实施地面重力测量异常困难。目前, 大约不到一半的国土面积完成了 1:20 万的重力测量, 另有不到一半的国土面积完成了 1:50 万和 1:100 万的重力测量。在青藏高原、新疆天山地区存在近 200 万 km² 的重力测量空白区, 在其他沙漠、沼泽、森林覆盖及海陆交错地区还存在许多盲区^[5-7]。这些地区的重力资料无论是在基础科学研究、矿产资源勘查, 还是在大地测量、军事应用方面都有极其重要的作用, 但远不能满足国民经济发展和军事建设的需求。而航空重力测量是解决这些地区重力测量的最佳途径之一。因此, 开展航空重力测量技术研究对于国民经济和国防现代化建设都具有重要的意义。

1 航空重力测量基本原理

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

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

式中, $\ddot{r}^i$ 为质点的惯性加速度; G^i 为引力加速度; f^i 为比力, 为重力仪或加速度计的观测值。

对于静态重力测量, 此时加速度 $\ddot{r}=0$, 通过调整水准气泡可使得重力仪的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, 而且精度可以达到很高, 但是人们更希望在动态下进行测量, 也即开展动态重力测量, 这不仅是因为测量速度更快, 而且测量范围更广。不过对于动态下的航空重力测量, 情况要复杂得多。这主要是由于惯性加速度 $\ddot{r}$ 不再为零。爱因斯坦广义相对论中的等效原理指出: 在一个封闭系统内的观测者不能区分作用于它的力是引力还是它所在的系统正在作加速运动, 也就是说, 惯性加速度所造成的“重量感”和牛顿万有引力的效应是完全一样的。在运动载体上, 重力仪就是这个封闭系统内的观测者, 它感受引力和惯性力的作用, 但不能对二者进行区别。

为了将引力加速度和惯性加速度进行分离, 有以下两种途径。① 将 2 个共基线的加速度计的输出求差, 以共模方式消除载体运动加速度 $\dot{v}^n$ 的影响, 如果共用基线是旋转稳定的, 则由该差值观测可得到重力梯度分量, 这就是重力梯度测量的基本原理。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。但是由于重力梯度测量对加速度计的精度要求非常高, 因此其技术难度很大。② 采用 2 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, 而另一个系统的输出不含引力加速度, 于是在同一个坐标系内对 2 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。这就是航空重力测量的基本原理。

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^[8]。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 3 个分量。目前航空标量重力测量已经进入实用阶段, 通常航空重力测量指的就是标量重力测量。航空矢量重力测量需要进一步获取重力扰动矢量的 2 个水平分量, 这有以下两种方法。① 间接估算法。间接估算法是目前通常采用的方法, 其基本原理是首先进行航空标量重力测量, 然后利用测得的广大地区的重力异常数据, 按费宁-梅内斯(Vening-Meinesz)公式计算垂线偏差(即重力扰动的水平分量)。间接估算法的缺点在于费宁-梅内斯公式理论上要求全球重力覆盖, 由于覆盖不完全引起的误差将叠加在数据噪声对估算的垂线偏差的影响中, 特别是在测区边缘上^[8]。② 直接测量法, 即直接利用观测仪器同时获取重力扰动矢量的 3 个分量。虽然直接测量法不存在间接估算法的缺点, 但是与标量重力测量相比, 其对稳定平台的姿态保持精度提出了更高的要求, 因此技术难度更大, 目前仍然处于研究探索阶段。

2 国内外研究现状

2.1 国外航空重力测量的研究现状

航空重力测量是从重力仪或加速度计测得的比力中扣除载体的运动加速度,得到重力值。因此,航空重力测量系统一般包括 2 个基本部分:载体运动加速度测量子系统和比力测量子系统。

20 世纪 50 年代末^[9],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,得到航空重力测量的精度为 10 mGal 左右,不能满足实际应用要求。到 20 世纪 80 年代末 90 年代初,由于载波相位差分 GPS(DGPS)技术以及新型重力仪的出现,才使得航空重力测量得到突飞猛进的发展^[10]。由于 GPS 的高精度和可靠性,目前各类航空重力测量系统都普遍采用 GPS 进行定位和测量载体的加速度。

各类航空重力测量系统的主要区别是比力测量系统。比力测量系统需要完成两个功能:① 测量比力的大小;② 将比力测量系统保持在当地地理坐标系内。在各类比力测量系统中,基于海/空重力仪的比力测量技术最为成熟,在 20 世纪 90 年代后又出现了基于三轴平台惯导系统 (Gimbaled Inertial Navigation System, GINS)、捷联惯导系统 (Strapdown Inertial Navigation System, SINS) 以及三轴加速度计的比力测量技术。

2.1.1 基于海/空重力仪的航空重力测量

目前广泛使用的重力仪以美国的 LCR (LaCoste&Romberg)重力仪、Bell 重力仪和德国的 KSS-31 重力仪为主。美国 LaCoste&Romberg 公司经过 9 年的精心设计,于 2001 年推出了新一代动态重力仪——航空/海洋重力仪 II (Air-Sea Gravity System IITM),该重力仪代表了当今世界海/空重力仪的最高水平。其实实验室静态重复性达到 0.05 mGal ($1\text{mGal} = 10^{-5}\text{m/s}^2$),动态重复性达到 0.25 mGal,月漂移率小于 3 mGal。为了保持重力仪的水平,通常将重力仪安装在双轴阻尼平台上,但是这种稳定方式不能完全消除水平加速度对重力仪输出的影响。Peters 和 Brozena 指出^[11],平台稳定性是采用海/空重力仪的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。

美国海军研究实验室(NRL)、丹麦国家测量与地政局(KMS)、德国波茨坦地学研究中心(GFZ)、瑞士苏黎世工学院(ETHZ)等研究单位对采用重力仪的航空重力测量技术进行了研究^[12-16],并从 1991 年开始先后在格陵兰岛、北极、南极等地进行了大量飞行试验。目前国外采用海/空重力仪的航空重力测量系统已完全可用并作为一种标准方法来获取中、低分辨率的重力场信息。至 2001 年,采用改进后的 LCR 海洋重力仪的航空重力测量系统的精度达到 1 mGal、分辨率达到 6 km^[17]。

2.1.2 基于三轴平台惯导的航空重力测量

俄罗斯莫斯科重力测量技术公司 (Gravimetric

Technologies Ltd) 和加拿大的 Sander Geophysics Ltd. (SGL) 公司等研究单位,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。俄罗斯莫斯科重力测量技术公司研制的 GT-1A 航空重力测量系统精度可达到 0.5 mGal、分辨率 1.5~2.75 km^[18]。加拿大 SGL 研制的航空重力测量系统 AIRGrav 的测量重复性精度达到 1 mGal,分辨率为 2.0 km^[19]。目前 AIRGrav 和 GT-1A 这 2 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^[20]。

2.1.3 基于捷联惯导的航空重力测量

在 Schwarz 教授的带领下,加拿大 Calgary 大学先于 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 (Strapdown Inertial Scalar Gravimetry, SISG) 的研究。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 3 次飞行试验,并与 LCR 重力仪、AIRGrav 和 SISG 3 种航空重力测量系统进行性能比较,结果显示 SISG 达到了 AIRGrav 和 LCR 重力仪的航空重力测量系统的精度,这表明,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^[21]。

2001 年起,在 BMBF-Geotechnologien-Programm 项目的资助下,德国 3 家科研单位开展了新型航空重力测量系统的研究^[22],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/1 km 的水平。参与单位包括巴伐利亚自然科学与人文科学学院 (Bavarian Academy of Sciences and Humanities) 的 BEK (Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung) 小组、慕尼黑国防军大学 (University of the Federal Armed Forces Munich) 的测地与导航研究所 (Institut für Erdmessung und Navigation, IfEN)、不伦瑞克技术大学 (Technical University of Braunschweig) 的飞行导航与控制研究所 (Institute of Flight Guidance and Control, IFF)。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 采用法国 Sigma 30 型激光陀螺捷联系统,并尝试进行矢量重力测量。

基于捷联惯导系统的航空重力测量系统具有的优点主要包括以下几方面^[23-24]。

1) 由于捷联惯导系统省却了复杂的机械结构,因此体积小、重量轻、成本低、可靠性高、功耗小。这使得系统可安装在小飞机或直升机上,也使得有可能将重力测量系统、地磁测量系统、电磁测量系统等同时安装在飞机上进行综合地球物理勘探,这将成倍地降低测

量成本。

2) 采用捷联惯导系统在飞行测量过程中不需要复杂的操作过程,与采用重力仪的系统相比,其测量成本要低、效率更高。

3) 采用捷联惯导系统既可进行标量重力测量,也可以进行矢量重力测量,其提供的测量信息更加丰富。

但是,采用捷联惯导系统的航空重力测量系统需要进一步突破的关键技术主要有以下几点^[23]。

1) 捷联惯导系统中由于将惯性传感器直接固联在载体上,其承受的动态环境更加恶劣,因此要求惯性传感器要有更好的性能,如大的动态范围、刻度因子稳定性等。

2) 提高利用载波相位 DGPS 测量载体运动加速度的精度仍然是提高航空重力测量精度的一个关键。

3) 由于飞机不规则运动和振动等因素产生的扰动加速度可达 10^6 mGal,而重力异常值通常只有 100 mGal 左右,极低的信噪比使得提取微弱重力异常信号的难度很大,因此滤波器设计是系统的关键任务之一。

2.2 我国航空重力测量的研究现状

我国在 20 世纪 80 年代末开始航空重力测量技术的研究。1988 年,中国科学院测量与地球物理研究所采用国产第三代重力仪 CHZ,成功地在 Z-8 直升机上进行了首次空中悬停重力测量试验^[25],在 5 个不同高度测得的重力平均值经归算后与地面重力值的偏差为 -0.4 mGal,标准差为 ± 2.3 mGal。

2002 年 11 月,由总参西安测绘研究所等单位研制的我国首台航空重力测量系统 CHAGS (Chinese Airborne Gravimetry System)通过鉴定。该系统由 LCR 航空重力仪、GPS 接收机、高度传感器、姿态传感器、数

据采集等部件组成。系统于 2002 年 3-4 月采用安-30 飞机在山西大同地区进行了 3 次飞行试验,飞行高度为 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,分辨率为 10 km,与地面重力测量数据的比对精度优于 ± 5 mGal。为检验 CHAGS 对轻小型固定翼飞机的适应性以及验证 CHAGS 在严寒气候条件下的作业性能,2003 年 11 月采用国产某新型航测机在哈尔滨进行了试验^[26]。试验结果表明,交叉点重力异常不符值的标准差为 1.9 mGal,相应的半波长分辨率约为 9 km。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、资源勘探等高精度应用的要求。

3 基于 SINS/DGPS 航空重力测量系统的组成

根据航空重力测量原理,基于 SINS/DGPS 的航空重力测量系统除了飞机以外,主要有以下分系统组成。

1) 捷联惯导系统。捷联惯导系统主要由 3 只高精度的石英挠性加速度计、3 只高精度陀螺仪以及相应的电路系统组成。捷联惯导系统在航空重力测量系统中主要有两个功能:① 测量比力;② 测量载体的姿态。

2) 减振系统。机载环境下,由于飞机发动机等引起的高频加速度经常大于所需要确定的重力异常的大小,在高频环境下,惯性器件的性能会降低,同时导航计算的压力也会大幅度增大。为了提高重力的精度和分辨率,一般采用减振系统来削弱高频加速度的影响。

3) GPS 系统。该子系统包括机载 GPS 接收机和地

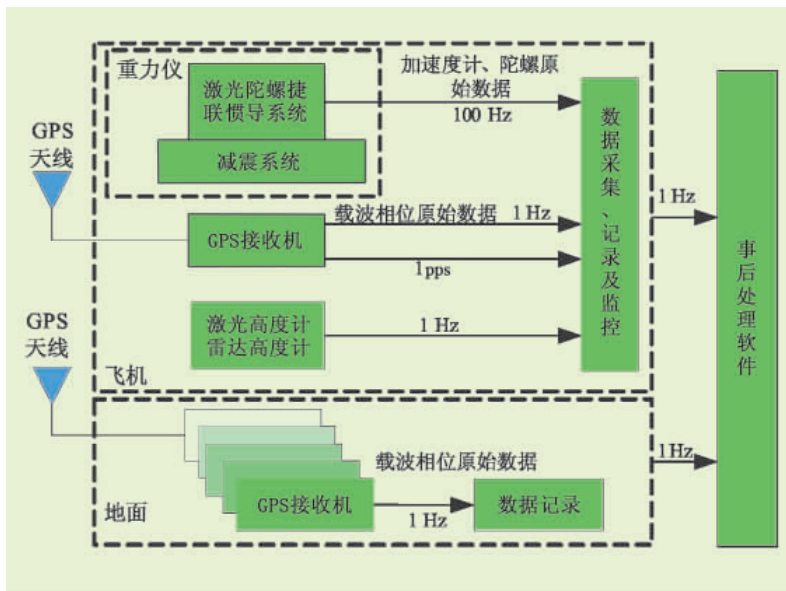


图 1 航空重力测量系统的结构框图

Fig. 1 Structure of airborne gravimetry system

面 GPS 接收机两部分,主要用于获取时间、空间三维位置、速度、加速度等信息,同时利用 GPS 接收机的秒脉冲信号 1 pps 进行各传感器之间的时间同步。

4) 高度传感器。用于测定飞机至地面的垂直距离和垂直加速度,以便将空中重力异常归算到地面。

5) 数据采集、记录与控制分系统。完成所需数据的采集、记录功能,并对系统的运行状态作监测和控制。

6) 事后处理软件。航空重力测量采用事后处理的方法。

基于捷联惯导的航空重力测量系统的组成如图 1 所示。

4 航空重力测量中关键技术分析

航空重力测量中包含的主要技术有比力测量、载体运动加速度测量、数字滤波、GPS 高精度定位、重力数据的向上/向下延拓、重力异常数据的解释及应用等。对于 GPS 高精度定位,目前的技术已经非常成熟,市场上已经有多种商业 GPS 事后处理软件,如 Waypoint, GrafNav, GIPSY, Bernese 等。重力数据的向上/向下延拓、数据解释及应用等是重力学中的内容,本文不作论述。

4.1 比力测量技术

利用惯导系统测量比力的基本原理是将重力传感器(加速度计)稳定在当地地理坐标系,重力传感器可测得比力的 3 个分量。对于平台惯导系统,采用的是物理平台,通过反馈控制直接使平台稳定在当地地理坐标系。对于捷联惯导系统,采用的则是数学平台,重力传感器固联在载体上,因此需要利用系统测得的载体姿态将重力传感器测得的比力值投影到当地地理坐标系。

比力测量误差来自加速度计的测量误差和姿态测量误差。对于航空标量重力测量,水平姿态误差对测量精度的影响较小,而加速度计的测量误差是主要的误差源。在 SISG 系统中,采用的是石英挠性加速度计 QA2000,其随机零偏受温度的影响很大,最大可达到 200 mGal 左右^[24]。为了消除/削弱加速度计的测量误差,Glennie 最初尝试对加速度计的随机零偏进行建模,以期通过卡尔曼滤波对加速度计的随机零偏进行估计,但没有取得成功。最后,Glennie 交差点平差法虽然取得了一些有意义的结果,但是并不能满足工程实用的要求。因此,提高加速度计的测量精度是研制实用型航空重力测量系统的关键,比如德国 BEK 最新研制的航空重力测量系统 SAGS 4 采用了高精度的温度控制^[27],使惯性级石英挠性加速度计达到了航空重力测量的精度要求。

由于惯导系统的误差随时间积累,因此需要采用外部观测测量来提高平台的稳定性。对于捷联惯导系统,

通常利用卡尔曼滤波器进行 SINS/DGPS 组合,以 DGPS 测得的高精度位置、速度为观测测量,对惯导系统的位置、速度、姿态以及惯性器件误差进行估计^[23]。

4.2 载体运动加速度测量技术

载体运动加速度测量精度是航空重力测量技术发展历史上的主要障碍,直到 20 世纪 80 年代末、90 年代初载波相位差分 GPS 动态定位技术的出现,才使得航空重力测量技术得到突破性的发展^[23, 28]。由于 GPS 的高精度、高可靠性,目前航空重力测量系统普遍采用载波相位差分 GPS 来测量载体的运动加速度。需要指出的是,虽然载波相位差分 GPS 使得航空重力测量重新焕发了生机,但是载体运动加速度测量仍然是提高航空重力测量精度和分辨率的主要障碍,因此提高加速度测量精度和分辨率仍然是航空重力测量中的一项重要任务^[23]。

4.3 数字滤波方法

在航空重力测量中,由于动态环境的影响及传感器测量噪声,使得直接得到的重力扰动测量值含有大量的测量噪声。这些测量噪声主要集中在高频段,而重力扰动信号又主要集中在低频段,因此,消除这些噪声的主要手段是采用低通滤波器。但事实上,设计一个性能良好的低通滤波器并不是一件很容易的事,这是由于:一方面有用的重力扰动信号的幅值很小,通常不足 100 mGal,而噪声的幅度可能比重力扰动信号高出百倍甚至上千倍,极低的信噪比使得信号的提取显得异常困难;另一方面,信号比噪声大的频带集中在低频端很窄的部分,而噪声占据了相当宽的频带,而且信号和噪声之间并没有明确的过渡带。因此,要有效地消除几乎遍布整个频带的噪声,其难度是不言而喻的。

4.4 温度控制技术

航空重力测量中要求加速度计的测量精度达到 1 mGal 的水平。研究表明,加速度计的测量误差主要受温度的影响,因此需要对加速度计表头及采样电路进行温度控制。为了使常用的石英挠性加速度计达到航空重力测量的要求,一般有以下 2 种方法可供选择:① 直接对加速度计进行精密温度控制,控制精度需要达到 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$,加拿大 SGL 公司研制的航空重力测量系统 AIRGrav 即采用这种方法;② 另一方法同样是进行温度控制,但是温控精度要求较低,只需要达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 左右,在这样的温控精度下加速度计测量精度达不到要求,因此还需要对温度误差进行建模并补偿。这种方法的优点是对温控的精度要求较低,因此实现起来难度较低,成本也较低,由于温度变化范围很小,因此相对于全温度范围的误差建模的精度要高。

4.5 减震技术

由于飞机发动机等引起的高频干扰会严重影响重力传感器的测量精度,因此不论是采用双轴平台的传

统航空重力测量系统还是采用三轴平台惯导的航空重力测量系统都采用了复杂的减震措施,比如在 L&R 海/空重力仪中就综合采用了气垫减震、液压阻尼减震和弹簧吊装减震等措施。相关文献表明,减震系统的截止频率需要达到 10 Hz 左右。由于在捷联惯导系统中没有了机械平台的阻尼作用,其受高频干扰对传感器的影响会更大,同时高频运动会引起较大的导航计算误差(比如圆锥运动误差),因此减震系统对捷联系统的意义更大。

4.6 测量数据校正技术

在航空重力测量所得到的原始数据校正包括偏心改正和水平加速度改正。偏心改正指的是 GPS 天线与重力传感器空间不一致所带来的误差,当前采用的改正算法通常将两者之间的空间距离看成是常值,事实上该距离是时变的。这有 2 个原因:① 缘于飞机本身是弹性体;② 由于采用减震系统后,捷联系统不再直接固连在机体上。因此需要对空间距离进行建模以提高偏心改正的精度。水平加速度改正指的是当平台(机械平台或数字平台)偏离当地水平面时,载体水平加速度所带来的比力测量误差。水平加速度改正是提高系统测量精度的重要方法,例如在俄罗斯的 GT-1A 系统中,平台的水平姿态误差可以达到 1 mas,但是通过事后处理可以达到 5 as,因此水平加速度改正是一种关键技术。

5 国内技术基础

实现基于捷联惯导系统的航空重力测量技术的关键技术中,高精度捷联惯导系统是实现高精度比力测量的关键部件。由于高精度捷联惯导系统产品为美国等美欧国家的管制产品,我国要引进满足航空重力测量要求的产品是极其困难的。

20 世纪 60 年代,美国研制成功激光陀螺,其具有的优良特性,使得其替代机械陀螺组成捷联惯导系统成为可能。激光陀螺是迄今为止在惯性技术领域唯一真正获得实际应用的非机电式中高精度惯性敏感仪表。

与传统的积淀陀螺相比,激光陀螺具有下列优点。

- 1) 性能稳定,抗干扰能力强,抗强冲击、振动。
- 2) 精度高。美国的高精度激光陀螺的精度达到 $0.000\ 5^{\circ}/\text{h}$,中等精度产品的零漂在 $0.001\sim 0.01^{\circ}/\text{h}$ 之间。
- 3) 动态范围宽,可测动态转速范围达 10^8 。
- 4) 寿命长,可靠性好。国外产品的寿命已经达到 10 万 h 以上,平均无故障时间(MTBF)优于 1 万 h。
- 5) 标度因数稳定。国外激光陀螺的标度因数稳定度高达 1 ppm ($1\text{ ppm} = 1/10^6$),国内激光陀螺的标度因数稳定度也已达到 10 ppm。
- 6) 启动迅速。由于没有像机电陀螺一样存在马达

的启动与稳定问题,激光陀螺启动后可短时间内(3~8 s)输出有用信息。

7) 数字量输出,无需模数转换。

激光陀螺构成的捷联惯导系统的惯性敏感元件直接与载体固联,省去了结构复杂的机械平台,因而较平台惯导系统体积、重量减小,可靠性提高,更适用于高动态环境,在军用、民用方面被广泛应用,因此在现在和未来一段时间里,中等精度的激光陀螺捷联惯导系统具有广阔的市场。

目前,国内二频机抖激光陀螺已有成熟产品,所构成的激光陀螺捷联惯导系统的精度已达到美国 Honeywell LASEREF III 型激光陀螺捷联惯导系统的技术指标,通过努力,可以解决航空重力测量中的关键技术。

6 结论

航空重力测量由于其测量速度快、范围广、成本低,且几乎可到达任何地区,因此可快速、连续、精确地测量大面积的地球重力场。目前,我国已有的航空重力测量系统还不能满足地质调查、资源勘探等高精度应用的要求。国外研究现状表明,基于惯导技术的航空重力测量系统更有潜力提高测量精度和分辨率。本文研究了基于 SINS/DGPS 的航空重力测量的原理及关键技术,并分析了目前国内的技术基础,在后继研究中,需要针对关键技术进行攻关。基于 SINS/DGPS 的航空重力测量技术的发展,将为我国的重力测量提供高效技术手段,对国民经济和国防现代化建设都具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] 王谦身. 重力学[M]. 北京:地震出版社, 2003.
WANG Qianshen. Gravimetry [M]. Beijing: Seismic Press, 2003.
- [2] 黄谟涛, 翟国君, 管 铮. 海洋重力场测定及其应用 [M]. 北京:测绘出版社, 2005.
HUANG Motao, ZHAI Guojun, GUAN Zheng. Measuring and application of ocean gravity field[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2005.
- [3] TORGE W. Gravimetry [M]. New York: Walter de Gruyter, 1989.
- [4] SNEEUW N, GERLACH C, MÜLLER J. *et al.* Fundamentals and applications of the gravity field mission GOCE[C] // Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS), Proceedings of the IAG Section II Symposium. Munich, Germany, 1998: 205-208.
- [5] 周坚鑫, 刘浩军, 王守坦. 航空重力测量在我国地球物理勘探中的应用展望 [C]//中国地球物理学会第十九届年会论文集, 南京, 2003: 173.
ZHOU Jianxin, LIU Haojun, WANG Shoutan. Prospect of

- the application of airborne gravimetry in Chinese geophysical exploration [C] //Proceedings of the 10th Annual Meeting of Chinese Academy of Geophysics, Nanjing, 2003: 173.
- [6] 陈俊勇, 文汉江, 程鹏飞. 中国大地测量科学发展的若干问题 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 681-688.
CHENG Junyong, WEN Hanjiang, CHENG Pengfei. Some issues of the development of geodesy in China [J]. Advances in Earth Science, 2001, 16(5): 681-688.
- [7] 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): 282-291.
ZHANG Changda. On the subject of airborne gravimetry and airborne gravity gradiometry [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(4): 282-291.
- [8] 胡明城. 现代大地测量学的理论及其应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2003.
HU Mingcheng. Theory and application of modern geodesy [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2003.
- [9] THOMPSON L. Airborne gravity meter test [J]. Journal of Geophysical Research, 1959, 64(4): 488.
- [10] WILLIAM R G. An historical review of airborne gravity[J]. The Leading Edge, 1998(1): 113-116.
- [11] PETERS M F, BROZENA J M. Methods to improve existing shipboard gravimeters for airborne gravimetry [C]//IUGG XXI General Assembly, IAG Symp G4, 1995: 39-45.
- [12] BROZENA J M. The greenland aerogeophysics project: airborne gravity, topographic and magnetic mapping of an entire continent[C]//Proceedings International Association of Geodesy Symposium, From Mars to Greenland: Charting Gravity with Space and Airborne Instruments, General Assembly of the IUGG. Vienna, Austria. 1991: 203-214.
- [13] Klingel   E E, Cocard M. Kinematic GPS as a source for airborne gravity reduction in the airborne gravity survey of Switzerland [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B4): 7705-7715.
- [14] VERDUN J, BAYER R, KLINGEL   E E, *et al.* Airborne gravity measurements over mountainous areas by using a LaCoste&Romberg air-sea gravity meter[J]. Geophysics, 2002, 67(3): 807-816.
- [15] OLESEN A V, FORSBERG R, KELLER K, *et al.* Airborne gravity survey of lincoln sea and wandel sea, north greenland[J]. Phys Chem Earth, 2000, 25(2): 25-29.
- [16] FORSBERG R, HEHL K. Development of a geoid mapping system for coastal oceanography (AGMASCO) [C]//Proceeding of the International Symposium Gravity, Geoid and Marine Geodesy (GraGeoMar96). 1996: 163-170.
- [17] WILLIAMS S. Development of a versatile, commercially proven, and cost-effective airborne gravity system [J]. The Leading Edge, 2001(6): 651-654.
- [18] GABELL A. The GT-1A mobile gravimeter [C] //ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop, Sydney, 2004: 55-61.
- [19] FERGUSON S T, HAMMADA Y. Experiences with AIRGrav: results from a new airborne gravimeter [C] // I-AG International Symposium on Gravity, Geoid, and Geodynamics 2000, Banff, Canada, 2000.
- [20] ARGYLE M, FERGUSON S, SANDER L, *et al.* AIRGrav results: a comparison of airborne gravity data with GSC test site data [J]. The Leading Edge, 2000, 19: 1134-1138.
- [21] BRUTON A M, HAMMADA Y, FERGUSON S, *et al.* 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. The Banff Center, Banff, Canada June 5-8, 2001, 2001: 542-550.
- [22] BOEDECKER G. Airborne gravimetry: activities and achievements 2002-2004 [C]// Geotechnologien Status Seminar "Observation of the System Earth from Space". Potsdam, 2004.
- [23] BRUTON A M. Improving the accuracy and resolution of SINS/DGPS airborne gravimetry [D]. Calgary: University of Calgary, 2000.
- [24] GLENNIE C L. An analysis of airborne gravity by strapdown INS/DGPS [D]. Calgary: University of Calgary, 1999.
- [25] 张善言, 周东明, 宗杰. 航空重力仪的试验 [J]. 地球物理学报, 1990, 33(1): 70-76.
ZHANG Shanyan, ZHOU Dongming, ZONG Jie. Test of airborne gravimeter [J]. Acta Geophysica Sinica, 1990, 33(1): 70-76.
- [26] 孙中苗, 夏哲仁, 石磐. 轻小型固定翼飞机的航空重力测量 [C]// 大地测量与地球动力学进展论文集, 武汉, 2004: 245-250.
SUN Zhongmiao, XIA Zheren, SHI Pan. Airborne gravimetry test using light fixed wing aircraft [C]// Proceedings of the progress of geodesy and geodynamics, Wuhan, 2004: 245-250.
- [27] BOEDECKER G, ST  RZE A. SAGS4-strapdown airborne gravimetry system analysis[C] // Observation of the Earth System from Space, Postam, 2006: 463-478.
- [28] HEIN G W, HEHL K, LANDAU H, *et al.* Experiments for an integrated precise airborne navigation and gravity recovery system [C] // Proceeding of the IEEE Position Location and Navigation Symposium. 1990: 279-285.

(责任编辑 李慧政)