

国防科学技术大学惯性技术实验室优秀博士学位论文丛书

航空重力测量中运动 加速度的高精度估计方法研究

High Accuracy Kinematic Acceleration
Determination for Airborne Gravity Surveying

李显 张开东 吴美平 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科学技术大学

优秀博士学位论文丛书

航空重力测量中运动加速度的 高精度估计方法研究

High Accuracy Kinematic Acceleration
Determination for Airborne Gravity Surveying

李 显 张开东 吴美平 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航空重力测量中运动加速度的高精度估计方法研究/
李显, 张开东, 吴美平著. —北京: 国防工业出版社,
2017. 2

ISBN 978-7-118-10266-6

I. ①航… II. ①李… ②张… ③吴…
III. ①航天器—载荷—重力加速度—航空重力测量
IV. ①V415. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 024619 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 10½ 字数 180 千字

2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 50.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

国防科学技术大学惯性技术实验室
优秀博士学位论文丛书
编委会名单

主任委员 胡小平 吴美平

委 员 杨功流(北京航空航天大学)
陈家斌(北京理工大学)
李四海(西北工业大学)
徐晓苏(东南大学)
蔡体菁(东南大学)
刘建业(南京航空航天大学)
赵 琳(哈尔滨工程大学)
胡柏青(海军工程大学)
王跃钢(火箭军工程大学)
吴文启(国防科学技术大学)

秘 书 练军想

序

大学之道,在明明德,在亲民,在止于至善。

——《大学》

国防科学技术大学惯性导航技术实验室,长期从事惯性导航系统、卫星导航技术、重力仪技术及相关领域的人才培养和科学研究工作。实验室在惯性导航系统技术与应用研究上取得显著成绩,先后研制我国第一套激光陀螺定位定向系统、第一台激光陀螺罗经系统、第一套捷联式航空重力仪,在国内率先将激光陀螺定位定向系统用于现役装备改造、首次验证了水下地磁导航技术的可行性,服务于空中、地面、水面和水下等各种平台,有力地支撑了我军装备现代化建设。在持续的技术创新中,实验室一直致力于教育教学和人才培养工作,注重培养从事导航系统分析、设计、研制、测试、维护及综合应用等工作的工程技术人才,毕业的研究生绝大多数战斗于国防科技事业第一线,为“强军兴国”贡献着一己之力。尤其是,培养的一批高水平博士研究生有力地支持了我军信息化装备建设对高层次人才的需求。

博士,是大学教育中的最高层次。而高水平博士学位论文,不仅是全面展现博士研究生创新研究工作最翔实、最直接的资料,也代表着国内相关研究领域的最新水平。近年来,国防科学技术大学研究生院为了确保博士学位论文的质量,采取了一系列措施,对学位论文评审、答辩的各个环节进行严格把关,有力地保证了博士学位论文的质量。为了展现惯性导航技术实验室博士研究生的创新研究成果,实验室在已授予学位的数十本博士学位论文中,遴选出23本具代表性的优秀博士学位论文,分成五个专题,结集出版,以飨读者。这五个专题分别是:(1)激光陀螺惯导系统技术;(2)地磁导航技术;(3)嵌入式组合导航技术;(4)航空重力测量技术;(5)自主导航理论与方法。

结集出版的目有三:其一,不揣浅陋。此次以专著形式出版,是为了尽可能扩大实验室的学术影响,增加学术成果的交流范围,将国防科学技术大学惯性导航技术实验室的研究成果,以一种“新”的面貌展现在同行面前,希望更多的同仁们和后来者,能够从这套丛书中获得一些启发和借鉴,那将是作者和编辑都倍感欣慰的事。其二,不宁唯是。以此次出版为契机,作者们也对原来的学位论

文内容进行诸多修订和补充,特别是针对一些早期不太确定的研究成果,结合近几年的最新研究进展,又进行了必要的修改,使著作更加严谨、客观。其三,不关毁誉,唯求科学与真实。出版之后,诚挚欢迎业内外专家指正、赐教,以便于我们在后续的研究工作中,能够做得更好。

在此,一并感谢各位编委以及国防工业出版社的大力支持!

吴美平

2015 年 10 月 09 日于长沙

前 言

航空重力测量是以飞机为载体快速经济地确定区域重力场的一种有效方式,由于可获得重力场信号的中高频段分量,是建立高精度、高分辨率地球重力场模型的重要数据来源之一,近年来得到广泛而深入的研究。

载体运动加速度的高精度估计是实现重力信号提取的核心技术之一,也是目前制约航空重力测量精度和分辨率进一步提高的主要因素之一。全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的高精度定位能力为解决这一问题提供了有效途径,通过相位差分 GNSS 方法可有效抑制卫星导航误差源的影响,实现载体位置、速度、姿态、加速度等运动状态参数的高精度估计。从研究现状来看,在测量基线较短时,该方法可得到较高的估计精度,但在应用中存在以下局限性:①在长基线条件下,随着差分残余误差的增大,估计精度不高,难以满足地球物理勘探等高精度航空重力测量应用需求;②作业时需基准站同步观测配合,在无基准站或难以建立基准站的测区内应用受限。针对航空重力测量多种实际应用条件下载体运动加速度的高精度估计问题,本书的主要内容如下:

(1) 基于航空重力测量的数学模型分析了航空重力测量中利用 GNSS 确定载体动态位置、速度和加速度的精度需求。同时以 SGA-WZ01 为例,介绍了捷联式航空重力测量系统的硬件和软件实现方式。

(2) 导航卫星速度和加速度的高精度计算是实现载体动态速度和加速度高精度解算的前提,分别研究了利用广播星历和精密星历进行导航卫星速度和加速度的计算方法,并通过对比分析表明,利用广播星历或精密星历计算导航卫星位置序列,再通过数字差分运算;可获得满足航空重力测量精度需求的卫星速度和加速度。

(3) 系统阐述了利用单基准站差分 GNSS 方法进行载体加速度的高精度估计的相关理论。推导了位置差分法和相位差分法的数学模型,深入分析了整周模糊度误差、周跳、星座突变误差、电离层传播误差、星历误差、基准站站址误差等 GNSS 误差源对载体速度和加速度估计精度的影响,并得出以下结论:①在位置差分法中,整周模糊度的解算误差会对载体加速度的估计精度产生较大影响,

必须予以准确固定,但基线较长时,单基准站差分 GNSS 模式下的整周模糊度准确固定存在困难;②在相位差分法中,探测和修复相位观测数据中的周跳是关键,否则会对解算结果产生较大影响,但长基线条件下小周跳的准确修复也难以得到保证;③经差分改正的残余电离层误差随基线距离延长对加速度的估计精度的影响增大,可采用不同频率相位观测值的组合方式消除低阶电离层误差的影响,但会导致随机性误差影响的增大。因此在长基线条件下,利用单基准站差分 GNSS 方法进行高精度载体动态加速度估计存在局限性。

(4) 针对长基线条件下采用单基准站差分 GNSS 方法存在局限性这一问题,提出了融合多个地面基准站同步观测信息进行载体加速度的高精度估计方法,阐述了该方法的关键技术和数据处理流程,并通过实测数据实验验证了这一方法在加速度估计精度上的优越性。作为这一方法的核心步骤和关键技术,网络模糊度的正确解算非常重要,基于航空重力测量的实际需求,提出了一种改进的网络模糊度解算和验证方法,详细阐述了该方法的基本原理和实现方法,设计的迭代数据处理流程可逐步实现网络模糊度的固定和验证,最后通过实测数据实验验证了该方法的有效性。

(5) 针对单基准站差分 GNSS 载体加速度估计方法在无基准站或难以建立基准站配合观测情况下应用的局限性,提出了基于精密单点定位的载体高精度加速度估计方法。对采用该方法进行加速度估计的主要误差源的影响特性进行了深入分析,研究表明:星历误差对估计结果的精度影响可以忽略不计,但会影响滤波估计的收敛速度,因此仍需采用事后精密星历;卫星钟差的影响较大,当钟差产品的采样间隔大于 30s 时,插值算法会引入 mGal 级的计算误差,因此必须选择采样间隔较小的精密钟差产品。

(6) 利用东海、南海航空重力测量试验的数据,对基于单点精密定位方法确定载体加速度的可行性进行了试验验证,结果表明,即使是在电离层活动相对活跃的南海实验中,基于精密单点定位和基于单基准站差分 GNSS 的载体加速度估计方法获得的结果具有较好的一致性。动态情况下,两种方法的差异小于 0.5mGal,从而验证了基于精密单点定位方法在载体高精度加速度估计中应用的可行性。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景和意义	1
1.2 航空重力测量	5
1.2.1 国外航空重力测量系统发展现状	5
1.2.2 国内航空重力测量系统发展现状	11
1.2.3 航空重力测量性能的应用需求	14
1.3 卫星导航技术	14
1.3.1 卫星导航系统的发展现状	15
1.3.2 GNSS 高精度定位技术的发展现状	17
1.3.3 GNSS 在航空重力测量中的应用研究	21
1.4 本书主要内容	24
第 2 章 捷联式航空重力测量的基本理论	26
2.1 航空重力测量的数学模型	26
2.1.1 常用坐标系统及其转换关系	26
2.1.2 航空重力测量的数学模型	28
2.2 GNSS 在航空重力测量中的应用及精度需求分析	30
2.2.1 运动载体的位置确定	30
2.2.2 运动载体的速度确定	34
2.2.3 运动载体的加速度确定	36
2.3 捷联式航空重力测量系统简介	36
2.3.1 硬件实现	36
2.3.2 软件实现	37
2.4 本章小结	38

第3章 导航卫星速度和加速度的计算方法	39
3.1 基于广播星历求解卫星状态参数	40
3.1.1 Kepler 根数形式广播星历	40
3.1.2 修正 Kepler 形式广播星历	43
3.1.3 位置速度型广播星历	44
3.2 基于精密星历求解卫星状态参数	45
3.2.1 数值差分法	45
3.2.2 解析差分法	46
3.3 精度对比分析	47
3.3.1 广播星历法精度分析	48
3.3.2 数值差分法精度分析	51
3.3.3 解析差分法精度分析	53
3.4 计算精度评估	54
3.5 本章小结	55
第4章 单基准站差分加速度估计方法	56
4.1 位置差分法和相位差分法	56
4.1.1 位置差分法	56
4.1.2 相位差分法	63
4.2 加速度估计误差分析	68
4.2.1 整周模糊度解算偏差	68
4.2.2 周跳	71
4.2.3 星座突变误差	72
4.2.4 电离层误差	75
4.2.5 星历误差	79
4.2.6 基准站站址误差	81
4.3 单基准站差分 GNSS 算法适用性分析	83
4.4 本章小结	84
第5章 多基准站差分加速度估计方法	85
5.1 网络误差模型及其估计方法	86

5.1.1	误差建模算法	87
5.1.2	误差模型的误差特性分析	89
5.2	改进的整周模糊度的解算及验证方法	93
5.2.1	整周模糊度解算及验证概述	93
5.2.2	基于基线测量误差粗差检验的网络模糊度验证方法	95
5.2.3	仿真性能分析	99
5.2.4	实测性能分析	102
5.3	联合参数估计模型	103
5.4	多基准站差分 GNSS 加速度估计方法的性能分析	105
5.5	本章小结	108
第 6 章	非差单点加速度估计方法	109
6.1	基于精密单点定位的加速度估计方法研究	110
6.1.1	概述	110
6.1.2	数学模型	111
6.2	精密单点加速度估计算法误差分析	115
6.2.1	星历误差的影响	115
6.2.2	卫星钟差的影响	117
6.3	试验验证和精度评估	128
6.3.1	试验验证的评估方法和评估指标	129
6.3.2	东海航空重力试验	129
6.3.3	南海航空重力试验	135
6.4	本章小结	137
第 7 章	总结与展望	138
7.1	工作总结	138
7.2	进一步的研究和展望	140
附录 A	数据场景说明	142
A1	东海航空重力测量试验	142
A2	南海航空重力测量试验	144
	参考文献	147

第1章 绪 论

“天时、地利、人和”是古人对战争能否取胜的判断依据,其中,“地利”是指有利的地理环境。然而,随着时代的发展被赋予了新的内涵,重力场作为重要的地球信息资源,也将在未来战场上发挥极为重要的作用。

1.1 背景和意义

地球重力场是地球物质分布和地球旋转运动信息的综合反映,是地球的重要物理特征之一。地球重力场知识是地球科学,特别是大地测量学、固体地球物理学和海洋科学进展中不可或缺的重要基础信息^[1,2]。

地球重力场作为一种重要的战略信息资源,在国防技术发展、国民经济建设、资源勘探和地球科学研究等多个方面均发挥着重要作用。然而,相对于西方发达国家,我国的重力测量和重力场建设起步较晚、起点较低,在基础理论、仪器研制、数据处理等核心技术方面和国外尚存在较大差距,领土范围内重力测量和研究的完成度及水平均较低^[3],因此,目前在我国开展并进一步深化重力测量的相关研究刻不容缓。

2013年1月16日,时任国务院总理温家宝主持并讨论通过了《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030)》,规划明确了未来20年我国重大科技基础设施发展方向和“十二五”期间的发展重点,指出“优先安排精密重力测量研究等16项重大科技基础设施建设”。借此契机,全面推进重力测量的相关研究对国家未来的科研发展具有长远意义。

具体而言,进行近地空间重力场(重力异常场)的高精度测量主要具有以下几个方面的用途。

1. 为近地空间的导航定位提供精确的重力基准

重力异常对惯性导航的精度构成影响。近地空间的运动载体均受到重力的作用,采用惯性导航方式时,重力场的模型误差是惯性导航的主要误差源之一,并且随着惯性器件精度的不断提高,这一误差源的影响日益凸显出来,特别是对高精度、长航时的惯性导航系统,已成为影响导航精度的主要误差源^[4]。研究

表明,在射程为4600km的弹道导弹发射中,10mGal(mGal为重力测量领域的常用单位, $1\text{mGal} = 1 \times 10^{-3}\text{Gal} = 1 \times 10^{-5}\text{m/s}^2$,下同)的重力异常对导弹落点造成偏差就超过70m,对制导精度产生严重影响^[5];文献[6]在进一步推导重力扰动和导航误差之间的误差传播关系的基础上,通过仿真研究表明:水平方向上的重力扰动(垂线偏差)对导航精度的影响较大,5"的垂线偏差在1h内造成的位置误差即达到300m,大于惯性器件造成的误差,成为长航时高精度惯性导航系统误差的主要误差源。文献[7]分析了重力场模型精度对近地卫星轨道计算产生的影响,通过分别采用JGM-3、EGM96和EIGEN-2三种不同精度的重力场模型进行轨道积分,结果表明,采用更高精度的重力场模型对轨道计算的精度有明显的改善。上述三种模型中,JGM-3模型是由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的戈达德太空飞行中心(Goddard Space Flight Center, GSFC)和德克萨斯州大学空间研究中心(Space Research Center, CRS)利用卫星数据、地面重力数据和测高数据生成的,该模型可以展开至70阶;EGM96是美国GSFC等机构于1998年完成的高精度重力场模型,可展开至360阶,其前70阶由卫星数据求得,71~360阶由卫星数据、地面重力数据和测高数据生成;EIGEN-2模型是由CHAMP卫星的183d卫星跟踪卫星(Satellite to Satellite Tracking, SST)数据生成,可展开至140阶,三种模型的精度依次增高。

重力测量是重力导航的基础。重力导航和重力辅助导航是近年来逐渐成为研究热点的一种新兴无源位场导航方式,利用实时测量的重力场信息,并通过与已知参考位场进行特征匹配,从而达到导航定位的目的。这种定位方式不需要接收外部信息或向外辐射能量,隐蔽性和自主性好,已经成为21世纪战略武器(如战略潜艇等)导航的新技术,也是各国日益关注和大力发展的关键技术^[8,9]。

实现重力导航的关键环节是建立高精度的参考重力场模型,因此重力场建模是重力测量的重要目标之一^[3,10]。不同的重力测量手段以不同的视角观测地球重力场,反映了不同波段的地球重力场信息,因此得到的重力测量数据所包含的信息内容也有差别。物理大地测量学的理论与实践表明,只有尽可能多地对不同类型观测数据进行融合处理,使各种数据之间得到相互补充,才能增强解算结果的质量和可靠性并拓宽其频谱范围,使其在精度和空间分辨率上有进一步的提高^[11]。融合多源重力测量数据建立更高精度的重力场模型也是当前重力研究的重要任务之一。目前广泛应用的高精度重力场模型EGM2008就融合了多种重力测量数据^[12],图1.1显示EGM2008模型的主要数据来源。

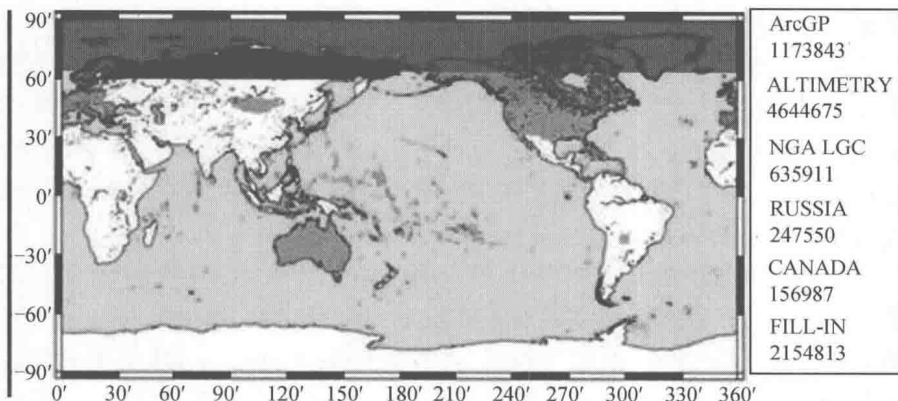


图 1.1 EGM2008 模型的主要数据来源

EGM2008 模型采用 2160×2160 阶球谐级数模型表示形式,重力异常的精度优于 10mGal ,分辨率约为 10km 。其主要数据来源于卫星重力测量。航空重力测量效率高且可高精度测量重力异常信号中的中高频分量,可作为精化卫星重力场模型的一种重要手段^[13]。

2. 为地球科学等相关领域研究提供有效的测量手段

通过重力测量并通过重力异常反演内部异常体,是研究地球科学的重要测量手段。重力测量可在研究地球的构造、大地及区域地质构造、隐伏岩体岩层等方面发挥重要作用,重力测量结果还可对地球形状进行研究,为导弹、宇航器飞行提供极为重要的基础资料^[14,15]。

重力测量在大地测量领域的一个重要应用是大地水准面的确定。大地水准面是代表地球形状的基本面,也是高程基准起始面^[16]。同时,大地水准面也是地球内部物质密度分布的外在表现,是地球物理反演的重要约束面。 cm 级的大地水准面是现代测绘,尤其是空间技术和信息化服务所必需的基本数据,而我国最新研制的似大地水准面模型 CGQ2000 的总体精度仅为 $\pm 0.36\text{m}$ ^[17],与国际先进水平相比还有相当大的差距。研究表明,利用高精度的重力测量值和其他水准测量数据,可确定区域 cm 级的大地水准面^[18,19]。

3. 为油气矿产资源勘探、环境保护、灾害预测等提供重要的信息来源

在资源勘探方面,重力测量可以在沉积覆盖区快速、经济地圈出对寻找石油、天然气或煤有远景的盆地或探测出与储油层有关的低密度体;圈定成矿带或直接发现掩埋较浅、体积较大的矿体或者对已知矿体进行追踪^[15]。

在环境保护和灾害预测方面,研究浮土下基岩面的起伏和有无隐伏断裂、空洞,以确保厂房、大坝的安全;还可在寻找水源、地面沉降研究、地热资源开发等

相关研究中发挥作用^[15,20]。

实施重力测量的手段主要包括地面重力测量、海洋重力测量、航空重力测量和卫星重力测量等。其中,航空重力测量是以飞机作为重力仪的运动载体实施区域重力快速测量的一种方式,其作业效率高,并可测量重力异常信号中的中高频分量,有效填补了地面重力测量和卫星重力测量频带之间的空白部分,因此逐渐成为重力测量的研究热点之一。

航空重力测量的概念虽然在 19 世纪就已经提出,并在 20 世纪 50 年代西方科研机构就设计了原理样机和开展了航空重力测量实验,然而真正迎来其发展道路上的春天是 20 世纪 90 年代以后,具有时代意义的标志是以美国全球定位系统(Global Positioning System, GPS)为代表的全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的成功研制和运营。

在 20 世纪 90 年代以前,如何高精度确定飞机自身的动态加速度是长期困扰高精度重力仪研制的一个难题,因为根据爱因斯坦广义相对论的“等价原理”,位于封闭系统内的观测者(这里是指重力仪敏感器件)无法分辨作用于它的力是引力还是它所在的整个系统自身正在做加速运动。在 GPS 研制成功以前,虽然可依靠雷达跟踪测量、气压高程测量等进行飞机载体的空间定位,但是测量精度较差,难以满足高精度重力测量的需求。GNSS 技术的发展,很好地解决了这一问题,特别是随着 GNSS 载波相位差分技术的发展,动态 dm ~ cm 级的定位精度可有效实现微弱重力信号的分离,可以毫不夸张地说,高精度航空重力测量正是伴随着卫星导航技术的发展而逐步走向实用化的,而且从目前研究来看,还没有找到更好的替代途径。

然而,从卫星导航系统自身的研制目的来看,主要是定位于高精度、全天候、全球性的无线电导航、定位、测速和授时的多功能系统,一般不作为测定加速度的传统手段。虽然前期的研究表明,利用卫星导航系统较好地解决了航空重力测量中的部分问题,但理论研究尚缺乏系统性。航空重力测量技术的不断发展,对载体运动加速度的测量精度需求也逐渐提高,卫星导航系统所引入的误差逐渐制约整体性能的提高,其作为高精度载体加速度确定的潜力尚需进一步进行挖掘。因此在航空重力测量技术日趋成熟之际,研究利用全球卫星导航系统进行高精度加速度估计具有重要的理论意义和实用价值。

首先,通过进一步挖掘卫星导航系统在高精度运动加速度估计中的潜力,进而提高航空重力测量系统的整体性能。在航空标量重力测量中,一般认为当测量精度优于 1 mGal,且分辨率达到 1 km 时,航空重力测量仪器可在资源勘查等领域发挥更加重要的作用^[21]。但目前重力测量系统的精度水平尚无法满足这一需求,精度和分辨率性能还存在提升空间。随着惯性导航器件性能的不断提

升,卫星导航系统中的各项误差源逐渐成为制约系统整体性能达到上述目标的主要因素。另外,目前普遍采用的单基准站相位差分 GNSS 必须与地面基准站配合同步观测,在无基准站或难以建立基准站的航空重力测区中应用受限。因此进一步挖掘卫星导航系统在高精度确定运动加速度方面的能力,对提升航空重力测量系统整体的性能具有重要的意义。

其次,拓展卫星导航系统的应用范畴,对合理利用空间资源、推广导航成果具有重要意义。传统的全球卫星导航系统一般定位于“高精度、全天候、全球性的无线电导航、定位、测速和授时的多功能系统”,一般不作为测定加速度的传统手段。在航空重力测量领域中的成功应用有效证明,GNSS 具有高精度确定加速度的潜力,通过对利用卫星导航系统高精度确定载体加速度的理论和方法进行系统性分析,有望进一步提升卫星导航系统的应用价值。

再次,基于卫星导航系统载体加速度的高精度确定在智能驾驶、运动状态监测、车辆预警等其他应用领域中也具有广泛的需求。目前,实现载体运动加速度度的测量一般依靠惯性器件,但存在价格昂贵、误差发散等缺点,限制其广泛应用。卫星导航系统作为高精度运动载体速度和加速度确定的一种低成本替代方式,在这些领域也具有广泛的应用需求,可带来巨大的经济效益^[22,23]。

最后,从国内外目前的研究现状来看,这一问题尚缺乏全面的分析和系统性的总结。特别是 GNSS 误差源对载体加速度确定的影响特性、算法的适用条件以及估计结果的精度评估等问题亟需解决。

1.2 航空重力测量

总体上,航空重力测量技术在西方发达国家的研究起步早、研究深入,目前航空重力测量仪器的研制水平也较高,研究内容涵盖重力异常测量、重力矢量测量、重力梯度测量等。国内研究基础较为薄弱,系统研究水平相对较低,但进展迅速,部分领域的技术水平已经接近或达到国际先进水平^[24,25]。

1.2.1 国外航空重力测量系统发展现状

以美国为代表的西方发达国家从 20 世纪五六十年代起就开展了航空重力测量技术的研究和航空重力测量仪器的研制工作,经过半个多世纪的发展,技术已经逐渐走向成熟,并成功研发包括航空标量重力测量、航空矢量重力测量、航空梯度重力测量等一系列仪器。从航空重力测量系统的发展历程来看,可分为以下几个阶段。

1. 探索性试验阶段

探索性试验阶段主要处于 20 世纪 50—60 年代。美国、苏联等西方发达国家相继进行了早期的航空重力试验,但关键技术尚未突破,试验效果不佳^[26,27]。

早期试验多采用固定翼飞机搭载海洋重力仪,为避免低空气流的扰动影响,试验飞行高度较高,同时采用航空摄影测量或多普勒雷达跟踪进行飞机空间位置的确定。试验结果表明,在分辨率为 50km 条件下精度可达几 mGal;另外还进行了一些利用直升机进行悬停航空重力测量试验,但试验效果不理想。

1966 年,美国海军采用 LaCoste & Romberg 海空重力仪进行了一次直升机载重力测量试验,该次试验采用 NASA 的地基雷达跟踪系统进行飞机的跟踪与定位,在 Maryland 和 Virginia 的试验结果表明,测线的交叉点不符值为 3 ~ 5mGal,初步验证了航空重力测量的可行性。

这一阶段的探索试验虽然验证了航空重力测量的广阔前景,但测量精度始终难以满足实际应用需求,主要包括两个原因:①对飞机载体的导航定位测速精度水平较低,导致计算的厄特弗斯改正精度较差;②没有找到分离附加在飞机垂直方向上加速度扰动影响的有效途径。

2. 平台式重力仪的技术逐步发展成熟阶段

平台式重力仪的发展也经历了两个阶段,即 20 世纪七八十年代的基于传统海空重力仪的航空重力测量系统和 90 年代以后的基于惯性导航平台的重力测量系统。到目前为止,平台式重力仪的技术发展最为成熟,测量精度也最高,是地质调查、资源勘探等高精度应用领域的主要测量手段^[28]。

基于传统海空重力仪的航空重力测量系统所采用的重力仪由海洋重力仪改进而成,如美国的 LCR(LaCoste & Romberg)重力仪、Bell 重力仪和德国的 KSS-31 重力仪。为了保持重力仪的水平状态,通常将重力仪安装在双轴阻尼平台上。该平台采用双轴反馈回路上的加速度计和陀螺使平台保持水平,平台的阻尼周期可以选择,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,使平台稳定性成为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^[29]。20 世纪七八十年代,Carson 地球物理公司采用 LCR 稳定平台重力仪、激光气压测高系统等硬件设备,并以 Sikorsky S-61 型直升机为载体,研制了直升机重力测量系统(Helicopter Gravity-Measurement System, HGMS),在 1974 年和 1982 年分别进行了飞行试验,结果表明, HGMS 和地面重力测量结果的吻合度优于 1.7 mGal,取得了成功^[26]。

美国海军研究实验室、丹麦国家测量与地政局等研究单位对采用重力仪的航空重力测量技术展开了深入研究,并从在 20 世纪 90 年代先后在格陵兰岛、北