

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

航空重力矢量测量 及误差分离方法研究

The Research
about Airborne Vector Gravimetry and
Methods of Errors Separation

蔡劭琨 张开东 吴美平 著 



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国防科学技术大学惯性技术实验室优秀博士学位论文丛书

航空重力矢量测量及 误差分离方法研究

The Research about Airborne Vector
Gravimetry and Methods of Errors Separation

蔡劭琨 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

航空重力矢量测量及误差分离方法研究/蔡劭琨,
张开东,吴美平著. —北京:国防工业出版社,2015. 10
ISBN 978-7-118-10311-3

I. ①航... II. ①蔡... ②张... ③吴...
III. ①航空重力测量—研究 IV. ①P223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 233069 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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 12 字数 205 千字

2015 年 10 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 (第二炮兵工程大学)
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,不宁为是。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

航空重力测量是一种快速地获取分布均匀、精度良好、大面积的重力场信息的有效方法。其中,捷联式航空重力仪以体积小、重量轻、成本低、可靠性高以及功耗小等优点成为航空重力测量研究的热点。除此之外,捷联式的重力仪还可以进行矢量测量,而重力矢量信息对于地球物理等诸多学科具有重要意义。

本书基于国防科学技术大学自主研制的捷联式航空重力仪 SGA-WZ,结合捷联式航空重力矢量测量的误差模型,在捷联式航空重力矢量测量误差分析、惯性器件误差对重力矢量测量的影响及补偿、重力扰动对重力矢量测量的影响及消除、飞机运动对重力矢量测量的影响以及重力矢量测量结果的误差分离等五个方面进行了研究。主要研究成果归纳如下:

(1) 对捷联式航空重力矢量测量的原理进行了研究,讨论了基于位置更新的重力矢量测量算法。根据重力矢量测量的误差模型,设计了正交实验来分析各影响因素对航空重力矢量测量的影响程度。

(2) 针对惯性器件误差对重力矢量测量的影响问题,提出了 IPSE 算法。在捷联式航空重力测量的数据处理中通常采用 SINS/GNSS 组合 15 状态卡尔曼滤波的方式来提高比力的测量精度,并将惯性器件的误差作为卡尔曼滤波器的滤波状态估计出来再进行补偿。然而,在水平匀速直线飞行条件下,15 状态卡尔曼滤波是不完全可观的。本书对 15 状态卡尔曼滤波的可观性进行了分析,分析了可观的状态及状态的组合,指出了加速度计零偏及姿态误差不能单独地估计出来,只能估计出它们的线性组合。本书在研究 SPS 算法的基础上提出了 IPSE 算法,使得器件误差的逐步估计过程更加明晰,书中还对 IPSE 算法进行了仿真分析和实例验证。实例处理结果表明,重力矢量北向分量的精度从 15.57mGal 提高到了 4.12mGal,东向分量的精度从 17.36mGal 提高到了 14.70mGal。

(3) 重力扰动的存在会对重力矢量测量带来影响。仿真分析了在导航解算中采用正常重力会对重力矢量的测量带来的误差。针对重力扰动对重力矢量测量造成的误差,本书还分析了重力矢量估计的迭代算法,通过仿真分析指出了迭代算法的使用条件,证明了迭代算法的有效性,并利用迭代算法对航空重力实测数据进行了处理。验证结果表明,通过迭代算法能够使重力矢量的水平分量收

敛到与真实值之间存在一个常值性的偏差。去除了直流分量之后,重力矢量北向分量的精度从 4.12mGal 提高到了 2.57mGal,东向分量的精度从 14.70mGal 提高到了 3.06mGal。

(4) 以飞机为载体的航空重力矢量测量会受到飞机运动的影响。分析指出了长周期运动和慢螺旋运动有可能会对航空重力测量带来影响,其中慢螺旋运动只是引起测量过程中的定位误差,对重力测量真正带来影响的是长周期运动。书中还以两次实际的航空重力测量为例说明了飞机的实际运动情况,进一步确认了长周期运动对飞行轨迹以及比力测量的影响,并给出了飞机在飞行测量过程中动态性的衡量指标。根据重力矢量测量的误差频谱,书中对怎样减小飞机运动带来的重力矢量测量误差进行了讨论,并对时间同步误差和姿态误差进行了估计和补偿,希望能在保证测量分辨率的同时提高测量的精度。最后,书中采用经验模分解的方式对重力扰动结果进行固有模态分解并去除其中的某些成分,最终实现了对飞机运动影响的抑制。

(5) 在得到的重力矢量测量结果中还存在着误差,针对这一问题,本书对重力矢量测量结果的误差分离算法进行了研究。首先研究了波数相关滤波(WCF)方法,该方法针对重复测线或者间隔比较近的平行测线,认为这些测线之间相关性比较低的成分是误差,通过抑制这些相关性较低的成分以实现误差的分离。经过 WCF 处理之后,重力扰动北向分量的精度从 2.49mGal 提高到了 1.43mGal,东向分量的精度从 2.81mGal 提高到了 1.80mGal。其次研究了卡尔曼滤波逆向解算的应用,通过综合卡尔曼滤波正向解算和逆向解算的结果来消除测量结果中的误差。与单独采用正向解算结果而得到的重力扰动相比,综合正向解算和逆向解算结果之后,重力扰动北向分量的重复性精度从 17.71mGal 提高到了 4.87mGal,东向分量的重复性精度从 4.55mGal 提高到了 4.02mGal。最后研究了利用全球重力场模型来校正重力扰动中存在的系统性偏差和低频趋势。通过全球重力场模型计算出的重力矢量中虽然不含有重力场的高频信息,但其包含的长波信息可用于校正重力扰动中的系统性偏差和低频趋势。在山东某地实验中,利用全球重力场模型 EGM2008 校正之后,重力扰动北向分量的重复性精度从 17.71mGal 改进到了 2.74mGal,东向分量的重复性精度从 4.55mGal 改进到了 3.20mGal。在某海域实验中,利用 EGM2008 校正之后,重力扰动北向分量的重复性精度从 50.24mGal 改进到了 7.46mGal,东向分量的重复性精度从 48.11mGal 改进到了 4.48mGal。

缩 略 语

AGEM	Airborne Gravity for Exploration and Mapping	加拿大航空重力勘探和制图项目
CMG	Canadian Micro Gravity Corporation	加拿大微重力公司
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency	美国国防部先进研究项目局
DOD	United States Department of Defense	美国国防部
DTU	Danish Technical University	丹麦技术大学
ERIM	Environmental Institute of Michigan	密歇根州环境协会
ETHZurich	Eidgenoessische Technische Hochschule Zurich	瑞士苏黎世联邦理工学院
FAF	University of the Federal Armed Forces Munich	德国慕尼黑国防军大学
GFMR	German Federal Ministry of Education and Research	德国联邦教育和科研部
GFZ	GeoForschungsZentrum	德国波茨坦地学研究中心
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球卫星导航系统
GINS	Gimbaled Inertial Navigation System	三轴平台惯性导航系统
GSFC	Goddard Space Flight Center	戈达德飞行中心
IfEN	Institut für Erdmessung und Navigation	测地与导航研究所
IFSAR/INSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar	合成孔径雷达干涉仪
IG	Institute of Geomatics	测量工程研究所
IGM	Instituto Geográfico Militar de Bolivia	玻利维亚军事地理学院
IMU	Inertial Measurement Unit	惯性测量单元
IPSE	Improved Parameter Stepwise Estimation	改进的参数逐步估计算法
ITC	Inertial Technology Scientific Center	俄罗斯惯性技术科学中心
JPL	Jet Propulsion Laboratory	喷气动力实验室
KMS	Kort & Matrikelstyrelse	丹麦国家测量与地政局

LDEO	Lamont – Doherty Earth Observatory	拉特蒙—多赫地球提观测中心
NASA	National Aeronautical and Space Administration	美国航空航天局
NGA	National Geospatial – Intelligence Agency	美国国家地理空间情报局
NIMA	The National Imagery and Mapping Agency	美国国家影像制图局
NRL	Naval Research Laboratory	美国海军研究实验室
PAF	Portuguese Air Force	葡萄牙空军
PSD	Power Spectrum Density	功率谱密度
RISG	Rotation Invariant Scalar Gravimetry	旋转不变式标量重力测量
SGL	Sander Geophysics Limited	加拿大 Sander 地球物理公司
SINS	Strapdown Inertial Navigation System	捷联式惯性导航系统
SISG	Strapdown Inertial Scalar Gravimetry	捷联式惯性标量重力测量
SPS	Stepwise Parameter Solidification	参数逐步固化算法
TU BS	Technical University of Braunschweig	德国布伦瑞克技术大学
UG	University of Calgary	加拿大卡尔加里大学
UM	University of Montpellier	法国蒙彼利埃大学
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya	加泰罗尼亚理工大学
WCF	Wavenumber Correlation Filter	波数相关滤波

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 航空重力测量国内外发展现状	3
1.2.1 国外航空重力测量发展现状	4
1.2.2 国内航空重力测量发展现状	14
1.3 航空重力矢量测量研究现状	16
1.3.1 国外航空重力矢量测量研究现状	16
1.3.2 国内航空重力矢量测量研究现状	19
1.3.3 航空重力矢量测量存在的问题	19
1.4 本书的研究目标、内容和组织结构	19
1.4.1 研究目标	19
1.4.2 研究内容及组织结构	20
第2章 航空重力矢量测量理论基础	23
2.1 航空重力测量基本原理	23
2.2 惯性器件的误差模型	24
2.2.1 加速度计的误差模型	24
2.2.2 陀螺的误差模型	25
2.3 SINS/GNSS 重力矢量测量方法	25
2.3.1 基本原理	26
2.3.2 重力矢量测量的数学模型和误差模型	33
2.4 航空重力矢量测量的误差分析	34
2.4.1 正交实验设计	34

2.4.2	实验结果分析	38
2.4.3	航空重力矢量测量对时间同步精度的要求	42
2.5	航空重力测量的精度评估	43
2.5.1	内符合精度	43
2.5.2	外符合精度	44
2.6	本章小结	44
第3章	惯性器件误差对重力矢量测量的影响分析和补偿	45
3.1	惯性器件误差对重力矢量测量的影响分析	45
3.1.1	惯性器件误差对重力矢量测量的影响	45
3.1.2	惯性器件误差对重力矢量测量影响的仿真分析	46
3.2	15 状态卡尔曼滤波器可观性分析	50
3.3	惯性器件误差的逐步估计和补偿	56
3.3.1	SPS 算法	57
3.3.2	IPSE 算法研究	59
3.4	加速度计漂移对重力测量影响的研究	70
3.4.1	加速度计的长期静态漂移	71
3.4.2	加速度计的短期动态漂移补偿	76
3.5	本章小结	78
第4章	重力扰动对重力矢量测量的影响分析和消除	79
4.1	重力扰动	79
4.1.1	利用地球重力场模型计算重力扰动三分量	79
4.1.2	重力扰动三分量的谱分布	81
4.2	重力扰动对重力矢量测量的影响分析	84
4.2.1	重力扰动对纯惯导解算的影响	85
4.2.2	重力扰动引起重力矢量测量误差的仿真分析	90
4.3	重力矢量估计的迭代算法研究	98
4.3.1	算法基本思路	98
4.3.2	算法仿真	99

4.3.3	算法实验验证	105
4.4	本章小结	109
第5章	飞机运动对重力矢量测量的影响分析	111
5.1	飞机的运动	111
5.1.1	飞机的自然运动	111
5.1.2	飞机的实际运动	116
5.2	飞机运动对重力矢量测量的影响	125
5.2.1	飞机运动引起重力矢量测量误差的原理	125
5.2.2	飞机运动引起重力矢量测量误差的频谱分析	126
5.3	减少飞机运动带来的测量误差	130
5.3.1	时间同步误差的补偿研究	131
5.3.2	姿态误差的估计和补偿研究	133
5.3.3	经验模分解	137
5.4	本章小结	142
第6章	重力测量数据误差分离方法	143
6.1	重力矢量测量数据处理流程	143
6.2	波数相关滤波方法的研究	144
6.2.1	波数相关滤波的原理	144
6.2.2	实验验证	145
6.3	逆向解算应用的研究	147
6.3.1	正向解算的结果	147
6.3.2	逆向捷联惯导算法的原理	147
6.3.3	逆向解算的结果	148
6.3.4	综合正向和逆向解算的结果	149
6.4	基于全球重力场模型 EGM2008 的误差分离方法研究	151
6.4.1	算法原理	151
6.4.2	实验验证	152
6.5	本章小结	158

第7章 全书总结.....	159
附录 A 常用坐标系的定义.....	162
附录 B SGA - WZ 的系统组成.....	163
附录 C SGA - WZ 飞行实验.....	165
C.1 山东某地飞行实验	165
C.2 某海域飞行实验	166
参考文献.....	168

第1章 绪 论

1.1 研究背景

地球重力场是反映地球内部物质分布、运动与变化状态的一种基本物理场,是描述地球的最重要的物理特征之一。地球上的任何物体都会受到地球引力和离心力的作用,引力和离心力的合力称为重力,重力的大小取决于地球内部物质及外部物质的分布和地球自转^[1],所以地球重力场制约着地球本身及其邻近空间的一切物理事件。地球重力场的确定对于大地测量学、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^[1-6]。重力信号的确定由两部分组成,一是重力信号幅值的确定,二是垂线偏差的确定。

在大地测量学中,大地测量的主要任务是确定地球的时空变化,包括地球表面和地球重力场。虽然从表面上看,这些研究都是地球的一些相对独立的特性,但是实际上它们具有内在的联系。在获得了垂线偏差信息之后,沿着测线对垂线偏差进行积分就可以确定出大地水准面^[7],大地水准面信息对于地球物理学家研究地形特征上的深部均衡补偿学说有很大的意义。

在空间科学中,自然天体和人造天体的轨道计算都离不开地球重力场数据,对月亮和行星飞行任务而言,同样需要了解各种有关的引力场参数,它们的轨道计算也离不开地球重力场。此外,在地面附近应用惯性导航系统也受到地球重力场的影响。所以,随着空间科学技术的飞速发展,地球重力场的研究越来越具有实用价值^[1]。

在地球物理学中,在地球表面测定的重力所包含的地球内部的物质分布信息可用于地球物理学的研究^[1]。利用向量重力仪直接确定陆地上的垂线偏差可以提供与卫星高度测量相类似的信息,这些信息可以帮助冰河学家理解重力不平衡导致的冰川移动。

在地球动力学中,通过在地球表面重复测定重力所获得的固体地球随时间变化的信息可应用于地球动力学的研究^[1]。

在海洋科学中,由于受到洋流的影响,由卫星测高数据确定的海洋表面并不是严格的等势面。因此,由重力测量确定海洋大地水准面,由卫星测高确定海面

高,再结合海洋密度数据,就可以获得洋流信息^[6]。

在资源勘探中,需要利用测得的重力异常场来确定扰动体的形状位置及扰动密度,再结合区域内地质、岩石及地球物理的各种相关信息进行综合分析就可以进行资源勘探^[1]。

在现代军事中,重力异常和垂线偏差等重力信息是影响导弹落点精度的重要因素。尤其是在发射首区,由于导弹起飞阶段速度慢,受局部重力场作用时间长,加上射程的误差积累,更需要一个精确的发射区局部重力场模型。另外,随着惯性器件的不断发展,器件的精度不再是影响导航精度的主要原因,此时,由于使用正常重力进行导航计算而引入的重力扰动的影响将成为制约高精度惯性导航精度的主要因素之一^[4,8]。

由于地球重力场在基础科学、军事和国家安全等领域中的重大战略和基础性意义,各国都投入了大量的人力、物力和财力进行相关的科学研究。如何快速、高精度地测量地球重力场是世界各国的研究热点。目前获取地球重力场信息的方法主要有地面重力测量、海洋重力测量、卫星重力测量和航空重力测量^[9]。

传统的地面重力测量是利用绝对重力仪进行的静态重力测量,需要操作人员进行逐点作业,虽然可以精确地获得地球重力场的高频信息,但是只能局限于陆地上的部分地区,在深山、密林、沼泽、沙漠等人迹难至的地区难以开展测量,因此受到的局限较大且效率十分低下。

海洋重力测量是利用测量船为载体进行的一种动态的重力测量,是采集海洋重力数据的主要方法,能获得较高频段的重力场信息。但因载体的速度较慢且只能限于在海面上作业,所以仍然是一种低效的重力测量方法。

卫星重力测量使得重力测量进入了一个新的时代,卫星重力测量可以实现全球覆盖,并且效率很高。但是卫星重力测量只能获得重力场的长波信息(波长大于 100km)^[10-13],对于中短波的重力测量无能为力。

航空重力测量是以飞机为载体,综合应用重力传感器、GNSS、高度传感器、姿态传感器等设备确定近地空间区域和局部重力场的方法,可以在沙漠、冰川、沼泽、原始森林等难以实施地面重力测量的地区进行作业,并快速地获取精度良好、分布均匀、大面积的重力场信息,可以填补地面重力测量和卫星重力测量之间的频段空白。如今,航空重力测量已经被认为是获取高精度、中高分辨率重力场信息的有效手段。

按照实现方式的不同,航空重力测量系统主要分为基于双轴稳定平台的重力仪、基于平台惯导的重力仪、基于捷联惯导的重力仪三种类型。基于捷联惯导的航空重力测量系统由于具有体积小、重量轻、功耗小、成本低、可靠性高等优

点,可以实现无人操作,是近十几年的研究热点之一,是航空重力仪的一个发展方向^[14-24]。按照测量对象的不同,可将航空重力测量分为航空重力标量测量和航空重力向量测量。航空重力标量测量只需要测量重力扰动向量垂直分量的大小(重力异常),航空重力向量测量需要测量重力扰动向量所有的三个分量(重力异常和垂线偏差)。

经过近 20 年的发展,目前已经有商用的航空重力标量测量系统,通常航空重力测量指的就是重力标量测量。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标量测量技术的重要任务。除此之外,航空重力测量的另一个热点是重力向量测量,它需要进一步获取重力扰动向量的两个水平分量。重力向量测量除了可以多获取重力扰动的水平分量(垂线偏差)之外,其意义在于^[25,26]:

(1) 通过对重力扰动向量水平分量的积分可直接得到大地水准面,这就可以避开利用大面积重力异常数据进行费宁—梅内斯数值积分的计算过程,而且得到的大地水准面在边界上的误差更小。

(2) 在现代军事学中,重力异常和垂线偏差是影响导弹落点精度的重要因素,导弹发射阵地除了需要经纬度、高程信息外,还需要重力异常、垂线偏差等参数。常用的方法是利用地球重力场模型进行垂线偏差的逼近计算,由于计算精度与模型的精度是息息相关的,而模型精度又与测区的重力数据精度、密度相关。所以,在偏远地区,由于重力数据的缺失,必将造成垂线偏差计算精度的降低。因此,航空重力向量测量对于提高导弹发射阵地重力异常、垂线偏差的测量精度,对导弹武器机动作战的实现具有重要的意义。

美国、加拿大、德国等国多年前就开始了航空重力向量测量的研究工作,我国在这方面的研究尚处于起步阶段。本书将重点针对捷联式航空重力向量仪垂线偏差误差分离的方法开展研究工作,为推动我国航空重力向量测量技术的发展提供技术支持。

1.2 航空重力测量国内外发展现状

航空重力测量的概念始于 20 世纪 50 年代末^[27-29]。其基本原理是: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以得到重力值。因此,航空重力测量系统一般包括两个基本组成部分:载体运动加速度测量子系统和比力测量子系统。载体运动加速度的测量曾经是航空重力测量发展道路上的主要障碍。1958 年 11 月,美国空军利用 KC-135 型飞机作为载体,使用了一台 LaCoste & Romberg 重力仪,并使用多普勒导航系统作为定位设备,在加利福尼