

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

高精度激光陀螺惯导系统 非线性模型参数估计方法研究

Research on the Estimation
of Nonlinear Model Parameters for High-Precision
Ring Laser Gyro Inertial Navigation Systems

杨杰 练军想 吴文启 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科学技术大学

学位论文丛书

高精度激光陀螺惯导系统非线性 模型参数估计方法研究

Research on the Estimation of Nonlinear
Model Parameters for High-Precision Ring
Laser Gyro Inertial Navigation Systems

杨 杰 练军想 吴文启 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书针对长航时航海导航和航空重力测量的高精度激光陀螺惯导系统,实现了石英挠性加速度计 μg 量级的参数标定精度。根据石英挠性加速度计不同的误差特性,分别建立了加速度计组件的线性测量模型和不同误差特性的非线性测量模型。针对加速度计组件不同的测量模型,本书提出了三种详细的标定算法,分别为基于转动矢量观测的参数分立标定算法,基于重力值观测的参数分立标定算法,基于姿态自主测量的参数系统级标定算法。在此基础上,本书还给出了高精度惯导系统参数标定精度综合验证和评估的有效方法。作者对书中涉及的重要模型和算法进行了严格的理论推导,并给出了大量详细的工程实例,可为惯性导航专业工程师和在校研究生提供有益的参考和指导。

图书在版编目(CIP)数据

高精度激光陀螺惯导系统非线性模型参数估计方法研究/杨杰,练军想,吴文启著. —北京:国防工业出版社, 2016.6

(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. 激光陀螺惯导系统技术)

ISBN 978-7-118-10268-0

I. ①高… II. ①杨… ②练… ③吴… III. ①激光陀螺仪—惯性导航系统—研究 IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 093902 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 16 字数 280 千字

2016 年 6 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。

结集出版的目的是有三：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9日于长沙

吴美平

2015年10月09日于长沙

前 言

面向长航时航海导航和航空重力测量的高精度激光陀螺惯导系统,要求系统中石英挠性加速度计组件的参数标定精度达到 μg 量级。为了实现加速度计组件参数的高精度标定,需要重点解决以下技术难题:

(1) 惯性器件的线性误差模型已不能满足高精度惯导系统参数标定的要求,需要建立非线性的误差模型和温度误差模型,解决非线性模型的参数估计问题。

(2) μg 级石英挠性加速度计参数的标定需求与发展相对滞后的惯性测试设备之间的矛盾突出,目前国内惯性标定转台的测角精度仅达到 $1'' \sim 2''$ 的水平,与 μg 级参数标定所要求的测角精度相差 1 个数量级,进而需要依靠激光陀螺惯导系统本身的高精度测量信息,在转台提供的姿态基准观测信息精度不足时标定石英挠性加速度计的非线性模型参数和温度漂移模型参数。

(3) 如何综合检验和评估验证惯性器件非线性模型参数的估计效果,也是尚未解决的关键技术问题。

故本书重点研究解决以下理论和工程问题:

(1) 非线性建模与待估计的非线性模型参数选择问题,即:如何根据各种非线性误差因素对惯性导航精度的影响程度,建立适当的非线性模型,估计主要的非线性模型参数。

(2) 非线性模型参数最优估计问题,即:如何在惯性测试设备精度不足甚至外场无专门的惯性测试设备条件下,实现石英挠性加速度计组件非线性模型参数包括温度误差模型参数的精确标定;如何分析石英挠性加速度计组件参数标定精度和测量位置之间的关系,从而优化标定路径和标定过程。

(3) 通过纬度未知条件下实现高精度惯导系统的自对准并估计初始纬度误差,再进行系统级检验非线性模型参数估计效果的问题。进而,如何解决自对准过程中惯导系统状态估计的可观性问题,建立新的自对准卡尔曼滤波模型,从而实现无需初始纬度信息的全自主惯性导航。

围绕上述理论和工程问题,本书完成的主要工作和研究成果概述如下:

(1) 提出了利用激光陀螺组件测量的转动矢量代替转台测角信息的石英挠性加速度计组件非线性模型参数的分立标定算法,克服了转台误差和减振器形变对加速度计组件参数标定精度的误差影响。

首先,根据石英挠性加速度计非线性误差的产生机理和对高精度航海导航误差的影响,以及所提出的先标定激光陀螺组件角增量线性测量模型参数再标定加速度计组件非线性模型参数的标定方法,建立了适合标定和补偿的加速度计组件非线性比力测量模型。其次,通过激光陀螺组件测量转动矢量,提出了面向航海导航应用的石英挠性加速度计组件非线性脉冲测量模型参数的迭代标定算法,仿真结果证明了迭代估计算法的无偏性,并实现了非线性模型参数的实时补偿。

(2) 提出了基于激光陀螺惯导系统多位置转动测量的石英挠性加速度计组件非线性模型参数系统级标定算法,设计优化了转动位置与顺序编排,为外场无专门惯性测试设备条件下的非线性模型参数标定提供了有效的解决方案。

建立了石英挠性加速度计组件非线性模型参数的系统级标定模型。借助激光陀螺组件短时间内高精度姿态保持的特点,基于三轴转台设计了一组合理的多组转动位置观测编排。选取转动前后相邻位置水平通道比力测量差值和垂向通道重力值测量误差为观测量,初始位置一次对准后多组转动有效估计出模型参数变化量。分析了非线性模型参数标定精度关于姿态误差的灵敏度特性,验证了高精度激光陀螺组件辅助姿态测量完成加速度计组件系统级参数标定的可行性。

(3) 提出了重力场内无姿态基准观测信息条件下加速度计组件两类非线性脉冲测量模型的参数迭代标定算法,以及观测位置编排的优化设计准则。通过重力场实验验证了标定后加速度计组件比力测量精度的各向一致性,解决了石英挠性加速度计组件单独测试标定与精度评估问题。

分别建立了仅考虑二次平方项误差和仅考虑交叉耦合项误差的石英挠性加速度计组件非线性脉冲测量模型。提出了迭代标定算法实现非线性模型参数的精确重力值标定,并通过归一化加速度计组件的脉冲输出获取初始倾斜矢量。通过最大化重力测量值关于不同模型参数的灵敏度函数,优化设计了18组观测位置编排。仿真验证了迭代估计算法和一步估计算法在求解线性模型参数时等价的估计性能。实验表明两种非线性参数模型均可实现高精度比力测量。由于二次平方项误差与加速度计组件及其坐标系基本无关,可根据加速度计单表重

力场实验或离心机测试实验先分离出二次平方项误差,再应用仅考虑交叉耦合项误差的非线性模型参数的无偏估计算法,从而解决高精度石英挠性加速度计组件独立进行非线性误差模型参数估计过程中的标定测试和精度评估问题。

(4) 提出了温变环境中基于转动矢量和重力值连续观测的石英挠性加速度计组件非线性温度误差模型参数的高精度快速标定算法,且参数标定过程中无需温箱和姿态基准观测信息,并通过实验解决了内场和外场条件下加速度计组件非线性温度误差模型参数的快速标定问题。

分别根据转动矢量连续观测和重力值连续观测,在温变环境中实现了石英挠性加速度计组件三种非线性温度误差参数模型的快速准确标定。首先,通过转动矢量的连续观测,采用无系统噪声的特殊卡尔曼滤波器估计出温度误差模型参数。其次,通过重力值的连续观测和线性模型参数的一步估计算法实现热参数标定;通过约束四元数优化算法实现不同参考坐标系之间姿态参数标定;恒温环境中通过转动矢量观测实现尺寸效应误差标定补偿。研究表明,系统冷启动过程中加速度计组件的敏感轴方向热变化可至 $5''$ 。最后,通过重力值的连续观测,提出迭代估计算法求解加速度计组件外场标定的非线性温度误差模型参数,并可估计恒温环境中标度因数和零偏的长期变化量。

(5) 提出了初始纬度未知条件下高精度惯导系统的自对准算法,从理论上证明了初始对准卡尔曼滤波中纬度误差的可观性。同时根据对纬度误差的估计精度,提供了检验惯导系统非线性模型参数估计效果的一种途径。

通过扩充了纬度误差状态变量的卡尔曼滤波精对准模型,实现了初始位置未知条件下高精度惯导系统的自对准。通过选取任意的初始经度,惯性导航过程中可以得到纬度的绝对测量值和经度的相对变化测量值,从而实现初始位置未知环境中的高精度惯性导航。借鉴非线性全局可观性理论,修正了传统初始位置已知条件下多位置对准 PWCS 可观性分析的部分结论。仿真和实验表明,系统绕方位轴进行四位置转动时纬度估计误差小于 $10''$,且纬度估计误差和高精度惯性器件的测量噪声强度密切相关。通过比较纬度绝对误差和经度相对误差,初始位置未知环境中的惯性导航精度与初始位置已知环境中的惯性导航精度相当。

实验分析表明,基于上述测设和评估方法,所采用的高精度激光陀螺惯导系统中石英挠性加速度计组件标度因数、安装误差、零偏和非线性模型参数标定补偿后,重力场范围内加速度计组件对比力的综合测量精度优于 $5\mu g$ 。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究动机	1
1.2 基础准备	3
1.2.1 惯导系统参数估计	3
1.2.2 惯性器件温度误差模型参数估计	9
1.2.3 惯导系统状态估计可观性分析	12
1.3 本书拟解决的主要问题	13
1.4 本书的主要内容和研究成果	15
第 2 章 温变环境中高精度激光陀螺非线性温度误差模型参数估计	18
2.1 激光陀螺标定参数温度漂移误差形成机理	18
2.1.1 激光陀螺标度因数温度漂移误差形成机理	18
2.1.2 激光陀螺零偏温度漂移误差形成机理	19
2.2 激光陀螺标定参数温度误差对惯性导航姿态解算精度影响分析	20
2.2.1 激光陀螺角增量测量误差温度参数模型	20
2.2.2 激光陀螺标定参数温度误差对姿态解算精度影响分析	22
2.3 激光陀螺标度因数温度误差特性实验研究	29
2.3.1 实验对象	29
2.3.2 试验方案	30
2.3.3 实验结果	32
2.4 激光陀螺零偏温度误差特性实验研究	34
2.4.1 实验对象	34
2.4.2 实验方案	34

2.4.3	静态温度误差参数模型试验	34
2.4.4	动态温度误差参数模型实验	36
2.4.5	激光陀螺测试电路温度实验	42
2.5	本章小结	44
第3章	基于激光陀螺组件辅助姿态测量的高精度石英挠性加速度计 组件非线性模型参数估计	45
3.1	石英挠性加速度计非线性误差特性机理分析	45
3.1.1	石英挠性加速度计非线性脉冲测量模型	45
3.1.2	石英挠性加速度计非线性交叉耦合项误差机理	46
3.2	石英挠性加速度计非线性误差对惯性导航解算性能分析	49
3.2.1	北向通道误差传播规律	51
3.2.2	东向通道误差传播规律	55
3.3	石英挠性加速度计组件非线性模型参数的两步估计算法	58
3.3.1	基于激光陀螺组件敏感轴方向约束的机体坐标系 定义	58
3.3.2	激光陀螺组件和石英挠性加速度计组件的测量模型	59
3.3.3	惯性组合非线性测量模型参数的标定	61
3.3.4	实验结果及验证分析	67
3.3.5	参数标定精度及误差分析	73
3.3.6	结论	74
3.4	航海导航应用中石英挠性加速度计组件非线性模型参数标定	75
3.4.1	一种改进的石英挠性加速度计组件非线性测量模型	77
3.4.2	石英挠性加速度计组件非线性模型参数的迭代估计 算法	80
3.4.3	石英挠性加速度计组件非线性项误差的实时补偿	83
3.4.4	非线性模型参数迭代估计算法仿真验证	85
3.4.5	非线性模型参数迭代估计算法实验验证	90
3.4.6	结论	94
3.5	石英挠性加速度计组件非线性模型参数系统级标定	94
3.5.1	相关坐标系定义	94
3.5.2	石英挠性加速度计组件非线性系统级参数标定模型	95

3.5.3	石英挠性加速度计组件非线性模型参数的系统级 标定	96
3.5.4	石英挠性加速度计组件系统级参数标定仿真验证	100
3.5.5	结论	108
3.6	本章小结	108
第4章	重力场内高精度石英挠性加速度计组件非线性模型参数估计	110
4.1	石英挠性加速度计组件线性模型参数的迭代估计算法	110
4.1.1	石英挠性加速度计组件线性脉冲测量模型	111
4.1.2	无姿态基准条件下加速度计组件线性模型参数一步 估计算法	112
4.1.3	无姿态基准条件下加速度计组件线性模型参数迭代 估计算法	114
4.1.4	两种无姿态基准参数估计算法的优化观测编排	120
4.1.5	基于仿真分析的两种无姿态基准标定算法性能比较	122
4.2	考虑二次平方项误差的非线性模型参数的迭代估计算法	124
4.2.1	考虑二次平方项误差的加速度计组件非线性脉冲 测量模型	124
4.2.2	考虑二次平方项误差的非线性模型参数迭代估计 算法	125
4.2.3	二次平方项系数优化观测位置编排	127
4.2.4	迭代标定算法仿真验证	128
4.3	考虑交叉耦合项误差的非线性模型参数的迭代估计算法	130
4.3.1	考虑交叉耦合项误差的加速度计组件非线性脉冲 测量模型	130
4.3.2	考虑交叉耦合项误差的非线性模型参数迭代 估计算法	131
4.3.3	交叉耦合项系数优化观测编排	133
4.3.4	迭代标定算法仿真验证	135
4.4	重力场空间加速度计组件参数标定与模型优化选择的 实验验证	137
4.5	本章小结	140

第 5 章 温变环境中高精度石英挠性加速度计组件非线性温度误差模型参数估计	142
5.1 石英挠性加速度计温度误差形成机理及对惯性导航解算性能分析	142
5.1.1 石英挠性加速度计表头温度误差形成机理分析	142
5.1.2 石英挠性加速度计标定参数温度误差对惯性导航解算性能分析	143
5.2 转动矢量连续观测下加速度计组件非线性温度误差模型参数标定	149
5.2.1 石英挠性加速度计组件热平衡过程分析	150
5.2.2 石英挠性加速度计组件热参数的比力积分增量线性测量模型	151
5.2.3 温变环境中加速度计组件非线性温度误差模型参数的标定	152
5.2.4 基于特殊卡尔曼滤波算法的非线性温度误差模型参数估计	153
5.2.5 系统冷启动过程中非线性温度误差模型参数标定结果及验证	155
5.2.6 结论	158
5.3 重力值连续观测下加速度计组件非线性温度误差模型参数标定	158
5.3.1 一种新的石英挠性加速度计组件非线性温度参数模型	159
5.3.2 基于重力值连续观测的石英挠性加速度计组件热参数标定	162
5.3.3 恒温环境中激光陀螺组件和加速度计组件相对姿态参数标定	171
5.3.4 恒温环境中加速度计组件尺寸效应参数标定	172
5.3.5 石英挠性加速度计组件热参数标定结果及实验验证	177
5.3.6 石英挠性加速度计组件尺寸效应参数标定结果及实验验证	184

5.3.7 结论	185
5.4 基于迭代估计的加速度计组件非线性温度误差模型参数外场 标定	186
5.4.1 石英挠性加速度计组件非线性温度参数外场标定 模型	186
5.4.2 基于迭代估计的非线性温度误差模型参数外场标定 算法	187
5.4.3 加速度计组件非线性温度误差模型参数优化观测编排	189
5.4.4 加速度计组件非线性温度误差模型参数外场标定 结果及验证	191
5.4.5 结论	194
5.5 本章小结	194
第 6 章 初始位置未知环境中惯导系统非线性模型参数估计	196
6.1 初始位置未知条件下惯导系统的多位置对准算法	196
6.1.1 初始位置未知的解析粗对准算法	197
6.1.2 初始位置未知的多组位置转动精对准算法	199
6.2 初始位置已知条件下惯导系统多位置对准可观性	201
6.3 初始位置未知条件下惯导系统多位置对准可观性	202
6.3.1 PWCS 可观性分析的充分条件	202
6.3.2 修正的 PWCS 可观性分析方法	205
6.4 初始位置未知条件下惯导系统多位置对准仿真和实验	212
6.4.1 仿真验证	212
6.4.2 实验验证	217
6.5 本章小结	221
第 7 章 总结和展望	223
7.1 本书总结	223
7.2 研究展望	231
参考文献	232

第1章 绪 论

1.1 研究动机

随着当前高精度惯性传感器技术的逐渐成熟,高精度惯性导航成为现代信息化战争条件下重要的导航技术。惯性导航是基于牛顿运动定律的航位推算技术^[1,2]。从惯性导航的工作过程分析,主要分为惯性信息测量、初始对准以及导航解算。惯性信息测量需要建立陀螺和加速度计的标定参数模型,并根据准确的输入观测量进行模型参数估计^[3]。初始对准技术以外界提供的位置和速度信息为观测量,并根据惯导系统的姿态误差、速度误差和位置误差方程估计不同时刻载体坐标系相对导航坐标系的姿态参数^[4]。导航解算采用高精度的数值算法积分运算角增量和速度增量信息^[5-7]。因此,惯性信息的精确测量是实现高精度惯性导航的重要前提。

由于惯性导航是完全自主的导航方法,不与外界的物理世界发生任何光电等联系,具有很高的隐蔽性、抗干扰性、可靠性和易维护性,工作环境不受限制,因此成为航空、航天和航海领域中广泛应用的导航方法^[8],极大提升了信息化战争条件下远程精确打击和非接触作战的作战效能。

惯性导航系统的姿态测量精度、速度测量精度以及导航定位精度主要受限于惯性信息的测量精度,因而对高精度惯性传感器提出了迫切需求。由于惯性传感器制造工艺的不断提高,激光陀螺的测量精度已优于 $0.001^{\circ}/h$,石英挠性加速度计的测量精度已优于 $1\mu g$,进而为代表惯性导航最高端水平的长航时和长航程的航海导航应用以及基于惯性导航系统的航空重力测量提供了坚实的技术基础^[9-11]。

然而,工程应用中的惯性传感器测量精度通常难以达到理论上的极限精度。制约惯性信息测量精度提高存在两个方面的因素:①激光陀螺和石英挠性加速度计由于材料和工艺技术方面的问题,本身存在难以克服的微小的系统性误差,且输出信号对外界环境温度变化反应敏感进而表现出一定程度的温度漂移误差特性^[1,2],而传统的线性测量模型难以满足热环境下角速率和比力信息的准确测量;②高精度惯性传感器极限测量精度对模型参数估计技术提出了愈加苛刻的要求^[1,2],而传统的惯性测试设备引入的测量误差难以为惯性器件模型参数

估计提供至少和器件精度匹配的观测量,并且传统的线性模型参数估计方法难以实现惯性器件完备的非线性模型参数的无偏估计。

以高精度石英挠性加速度计的参数标定为例。近年来,美国 Honeywell 公司研制的 QA-3000 型石英挠性加速度计测量精度达到 $1\mu\text{g}$,研制的 16PIGA 和 SFIR-J 陀螺加速度计测量精度分别达到了 $0.01\mu\text{g}$ 和 $0.1\mu\text{g}$,代表当前加速度计的世界最高水平^[12]。此外,国内航天 33 所生产的石英挠性加速度计精度也已接近 $0.1\mu\text{g}$ 。同时,由于先进飞行控制、导航制导和目标探测技术的发展牵引,惯性测试设备的测量精度也不断提升。近年来,瑞士 Carco Electronics 公司、Acutronico 公司和美国的 Ideal Aerosmith 公司等研制的高精度转台角位置测量精度已达到 $0.5''\sim 1''$,国内研制的转台测角精度也已达 $1''\sim 2''$ ^[12]。显然,对于精度为 $0.01\sim 0.1\mu\text{g}$ 的加速度计参数标定,需要测角精度至少为 $0.02''\sim 0.002''$ 的转台,远超于测角机构的当前世界最高水平。因此,迅速提升的加速度计测量精度和发展相对滞后的惯性测试设备之间存在着短期内难以解决的根本矛盾:①目前国内精度为 $0.1\sim 1\mu\text{g}$ 的高精度石英挠性加速度计迫切需要精度为 $0.02''\sim 0.2''$ 的精密转台或分度头与之匹配;②当前惯性测试设备的精度难以达到要求,且由于受限于机械加工和控制误差的制约,未来提升的空间小,周期长,严重制约了高精度加速度计的测试性能。随着新型加速度计技术的成熟与完善,比如冷原子加速度计的测量精度将优于 $10^{-4}\mu\text{g}$,这种惯性器件与惯性测试设备之间的冲突将更加尖锐。从工程应用的角度讲,高精度惯性测量单元中通常包含 3 个激光陀螺和 3 个石英挠性加速度计,由于激光陀螺组件的抖动耦合误差、系统减振器的形变误差、IMU 机械结构设计误差等^[1,2],加速度计组件的测量精度通常难以达到单器件的极限精度。因此,需要研究更加符合工程应用的加速度计组件模型参数的新型标定方法和技术,以期彻底摆脱惯性测试设备发展缓慢的技术瓶颈。

此外,惯性导航作为完全自主的航位推算导航方法,其初始对准过程中通常需要外界提供准确的位置和速度信息。对于 GPS 测量信号难以获取的特殊应用,比如水下自主潜航器以及地下煤矿区域导航等应用^[9-11],需要研究初始位置未知条件下惯导系统的自对准技术进而实现自主导航。

从算法理论的角度,未知纬度条件下的初始对准需要建立新的自对准滤波模型,并根据基于线性化或分段线性化模型的可观性分析方法以及非线性的全局可观性分析方法分析惯导系统状态估计的可观性问题。从工程应用的角度,纬度误差估计要达到一定的精度,激光陀螺惯性导航系统本身的精度必须足够高,进而对惯性器件参数标定精度提出了更高的要求,基于非线性的误差模型和温度影响模型要反映惯性器件的实际误差特性,同时要符合工程应用需求。此

外,根据纬度误差的估计精度,也可以检验评估系统非线性模型参数的估计和补偿效果。

鉴于上述分析,本书重点解决高精度激光陀螺惯导系统非线性模型参数估计问题,补偿激光陀螺组件参数的温度漂移误差、石英挠性加速度计组件参数的温度漂移误差,以及石英挠性加速度计组件参数的非线性误差,进而测量高精度的角增量和比力积分增量信息,建立更加符合工程应用的自对准误差模型,实现初始位置未知环境中惯性导航真正意义上的全自主工作模式。

1.2 基础准备

随着我国高精度激光陀螺技术和石英挠性加速度计技术的逐渐成熟,惯性信息的测量精度已接近国际先进水平,但惯导系统的参数估计技术以及误差补偿方法还存在一定的差距,进而制约惯导系统的性能提高。下面主要分析国内外惯导系统参数估计、惯性器件温度误差模型参数估计、惯导系统状态估计可观性相关技术的研究进展。

1.2.1 惯导系统参数估计

惯导系统的参数估计,主要指惯性测量单元的参数标定,即通过建立惯性器件组件的测量模型,以系统辨识和参数估计理论为基础,估计出测量模型中的各项参数,使输出信号与输入的被测量相匹配的过程^[1,2]。

1.2.1.1 惯性器件分立标定参数估计

根据 IEEE 关于陀螺标定测试的相关技术规范^[13-18]和加速度计标定测试的相关技术规范^[19-22],以及相关国军标的要求^[23-26],根据精密转台提供姿态基准进行模型参数估计,目前国内外已有一系列成熟的惯性器件参数标定方法^[27-35],常用的技术手段是根据转动角速率测试进而估计陀螺参数,根据多组位置静态测试进而估计加速度计参数。如张树侠^[27]利用双轴位置转台的正反转角速率测试实验标定激光陀螺组合参数;Niu^[28]利用改进的六组位置静态测试、Hung^[29]利用 12 组位置静态测试标定加速度计组件参数;曹宁生^[30]、陈北鸥^[31]、邓志红^[32]、范盛林^[33]、刘永红^[34]等分别通过三轴精密转台设计了转动速率和多组位置静态测试编排,有效估计出陀螺组件和加速度计组件的参数。在研究不同标定观测编排方案对光纤陀螺捷联惯导系统参数估计性能的影响上,何昆鹏^[35]采用了 D-优化回归原理比较了 6 位置、20 位置、24 位置、26 位置、30