

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

# 基于旋转调制的高精度激光陀螺 寻北仪误差建模与补偿方法研究

Research on Error Modeling and  
Compensation Methods for High Precision Ring Laser  
Gyroscope North-finder Based on Rotation-Modulation

张岩 曹聚亮 吴文启 江明明 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

# 基于旋转调制的高精度激光陀螺寻 北仪误差建模与补偿方法研究

**Research on Error Modeling and Compensation  
Methods for High Precision Ring Laser Gyroscope  
North - finder Based on Rotation - Modulation**

张 岩 曹聚亮 吴文启 江明明 著

國防工業出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

基于旋转调制的高精度激光陀螺寻北仪误差建模与补偿方法研究/张岩等著. —北京:国防工业出版社,2017.2  
ISBN 978-7-118-11173-6

I. ①基… II. ①张… III. ①激光陀螺仪—误差补偿 IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 024616 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 10 $\frac{3}{4}$  字数 185 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

高精度寻北仪技术研究对于发展我国陆用武器装备具有重要意义。随着激光陀螺生产技术的日渐成熟,采用激光陀螺研制高精度寻北仪成为可能。理论上,速率偏频激光陀螺寻北仪可消除抖动偏频激光陀螺频繁过锁区所产生的随机游走误差的影响,大幅度提高寻北精度。本书针对速率偏频激光陀螺寻北仪系统,对其误差传播特性、误差建模与补偿方法和寻北算法等进行了深入探讨,主要工作如下:

(1) 提出了基于单方向连续旋转的旋转调制式速率偏频激光陀螺寻北仪实现方案,避免了转动机构旋转换向引入的动态误差。针对单陀螺、三陀螺、双陀螺三种不同配置的速率偏频激光陀螺寻北仪方案,研究了激光陀螺测量误差、加速度计测量误差、转台测量误差和安装误差等误差因素对寻北误差的影响;通过对寻北仪主要器件测量误差特性的研究和分析,指出了寻北算法需要解决的主要问题。

(2) 针对单陀螺速率偏频激光陀螺寻北仪,从激光陀螺测量误差、转台测角误差和转台台面倾斜等方面对寻北算法进行了系统的研究和分析,提出了基于低通滤波与旋转调制相位测量的寻北算法。基于速率偏频激光陀螺测量误差特性,建立了等效标度因数误差模型及其补偿方法;针对转台测角误差,分析了测角周期性误差和随机误差对寻北精度的影响;针对寻北仪实际工作时的转台台面倾斜情况,对台面倾斜引起的寻北误差进行了研究,得到了寻北误差与寻北仪姿态角的定量关系表达式。通过寻北误差方程揭示出各误差因素在寻北误差中的传播特性,提出了误差分配方法,对不同精度寻北仪需求的器件选择具有一定的指导意义。通过单位置寻北和多位置寻北实验,对寻北算法和误差分析的结论进行了实验验证。

(3) 针对三陀螺速率偏频激光陀螺捷联寻北系统,研究了寻北系统的标定方法,定量分析了陀螺角速度测量精度和转台整周定位精度等因素对安装关系矩阵标定精度的影响,并通过实验验证了标定方法的有效性。提出了基于静基座条件约束和旋转调制情况下 IMU 测量值周期性变化特性的速率偏频激光陀

螺和石英挠性加速度计误差建模补偿方法。通过误差补偿,激光陀螺的等效零偏稳定性优于 $0.0003^{\circ}/\text{h}$ ,加速度计等效零偏的稳定性优于 $1\mu\text{g}$ ,大大提高了陀螺和加速度计的使用精度。基于各误差状态对寻北精度的影响程度,对系统状态方程进行了降维设计,提出了寻北算法并对误差传播特性和精度进行了分析。进行了单位位置寻北和多位置寻北实验研究,验证了寻北算法的有效性。

(4) 完成了由两个激光陀螺和三个加速度计组成的寻北系统设计,提出了静基座条件下的基于虚拟陀螺的寻北算法设计原理。分析了虚拟陀螺敏感轴方向选取的重要性,并对虚拟陀螺的精度进行了分析。进行了单位位置寻北和多位置寻北实验研究。对选取其他敏感轴方向构建虚拟陀螺情况进行了研究,进一步揭示了虚拟陀螺敏感轴方向合理选取的重要性。

(5) 进行了阵风扰动、典型车载扰动和不同温度环境等环境适应性实验研究,研究表明,寻北系统具有较好的环境适应性,在阵风扰动、典型车载扰动和不同温度环境均具有较高的寻北精度。

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第1章 绪论                         | 1  |
| 1.1 背景及意义                      | 1  |
| 1.1.1 高精度寻北仪技术背景及意义            | 1  |
| 1.1.2 寻北仪研究现状                  | 1  |
| 1.2 激光陀螺寻北仪技术研究进展              | 3  |
| 1.2.1 解析式陀螺寻北仪技术               | 4  |
| 1.2.2 捷联惯导系统初始对准技术             | 5  |
| 1.2.3 旋转调制技术                   | 8  |
| 1.2.4 速率偏频激光陀螺                 | 8  |
| 1.3 本书的研究内容、组织结构               | 10 |
| 第2章 寻北仪误差传播及器件误差特性分析           | 13 |
| 2.1 旋转调制式速率偏频激光陀螺寻北仪实现原理       | 13 |
| 2.1.1 激光陀螺工作原理概述               | 13 |
| 2.1.2 旋转调制式激光陀螺寻北仪实现原理         | 15 |
| 2.2 单陀螺速率偏频激光陀螺寻北仪方案及误差传播分析    | 16 |
| 2.2.1 单陀螺速率偏频激光陀螺寻北仪方案         | 16 |
| 2.2.2 单陀螺速率偏频激光陀螺寻北仪误差传播分析     | 18 |
| 2.3 三陀螺速率偏频激光陀螺捷联寻北系统方案及误差传播分析 | 19 |
| 2.3.1 三陀螺速率偏频激光陀螺捷联寻北系统方案      | 19 |
| 2.3.2 三陀螺速率偏频激光陀螺捷联寻北系统误差传播分析  | 22 |
| 2.4 基于虚拟陀螺原理的双陀螺寻北系统方案及误差传播分析  | 24 |
| 2.4.1 基于虚拟陀螺原理的双陀螺寻北系统方案       | 24 |
| 2.4.2 基于虚拟陀螺原理的双陀螺寻北系统误差传播分析   | 25 |
| 2.5 寻北仪主要器件误差特性分析              | 25 |

|       |                              |    |
|-------|------------------------------|----|
| 2.5.1 | 速率偏频激光陀螺误差特性分析               | 26 |
| 2.5.2 | 石英挠性加速度计误差特性分析               | 31 |
| 2.5.3 | 单轴转台误差特性分析                   | 34 |
| 2.6   | 本章小结                         | 38 |
| 第3章   | 单陀螺速率偏频激光陀螺寻北仪算法研究           | 39 |
| 3.1   | 转台台面严格水平情况下的寻北算法             | 39 |
| 3.1.1 | 寻北原理                         | 39 |
| 3.1.2 | 速率偏频激光陀螺测量误差分析与误差补偿方法        | 42 |
| 3.1.3 | 转台测角误差建模与补偿方法                | 54 |
| 3.1.4 | 转台台面严格水平情况下的寻北算法描述           | 59 |
| 3.1.5 | 算法误差传播特性及精度分析                | 60 |
| 3.2   | 转台台面倾斜情况下的寻北算法               | 64 |
| 3.2.1 | 寻北原理                         | 64 |
| 3.2.2 | 滚动角和俯仰角的计算方法                 | 65 |
| 3.2.3 | 地球自转角速度矢量在转台台面中投影角度的<br>计算方法 | 67 |
| 3.2.4 | 转台台面倾斜情况下的寻北算法描述             | 69 |
| 3.3   | 寻北误差传播特性及算法精度分析              | 70 |
| 3.3.1 | 转台台面倾斜引起的寻北误差特性分析            | 70 |
| 3.3.2 | 寻北算法精度分析                     | 72 |
| 3.3.3 | 台面倾斜对激光陀螺标度因数补偿方法的影响         | 73 |
| 3.4   | 寻北实验验证                       | 74 |
| 3.4.1 | 激光陀螺实测信号分析                   | 74 |
| 3.4.2 | 单位置寻北实验                      | 75 |
| 3.4.3 | 多位置寻北实验                      | 79 |
| 3.5   | 本章小结                         | 82 |
| 第4章   | 三陀螺速率偏频激光陀螺捷联寻北系统算法研究        | 83 |
| 4.1   | 寻北系统标定方法                     | 83 |
| 4.1.1 | IMU 标定方法                     | 83 |
| 4.1.2 | IMU 与转台安装关系矩阵标定方法            | 93 |

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| 4.1.3 | 转台角度标定方法                      | 95  |
| 4.1.4 | 真北方向标定方法                      | 96  |
| 4.1.5 | 速率偏频激光陀螺参数标定方法                | 96  |
| 4.2   | 旋转调制情况下捷联惯导系统初始对准算法的实验验证      | 99  |
| 4.2.1 | 旋转调制情况下的捷联惯导系统初始对准算法          | 99  |
| 4.2.2 | 机械抖动激光陀螺捷联惯导系统初始对准<br>实验验证与分析 | 104 |
| 4.3   | 基于运动信息的惯性器件误差建模补偿方法及寻北算法      | 104 |
| 4.3.1 | 速率偏频激光陀螺等效标度因数误差建模与补偿方法       | 105 |
| 4.3.2 | 加速度计等效零偏误差建模与补偿方法             | 111 |
| 4.3.3 | 系统状态方程降维设计                    | 115 |
| 4.3.4 | 三陀螺速率偏频激光陀螺捷联寻北系统算法描述         | 116 |
| 4.3.5 | 寻北系统误差影响及算法精度分析               | 116 |
| 4.4   | 寻北实验验证                        | 118 |
| 4.4.1 | 寻北系统单次实验                      | 119 |
| 4.4.2 | 单位置寻北实验                       | 119 |
| 4.4.3 | 多位置寻北实验                       | 120 |
| 4.5   | 本章小结                          | 122 |
| 第5章   | 基于虚拟陀螺原理的双陀螺寻北系统算法研究          | 124 |
| 5.1   | 静基座条件下虚拟陀螺的构建原理               | 124 |
| 5.2   | 基于虚拟陀螺原理的双陀螺寻北系统算法实现与精度分析     | 126 |
| 5.2.1 | 基于虚拟陀螺原理的双陀螺寻北系统设计            | 126 |
| 5.2.2 | 基于虚拟陀螺原理的双陀螺寻北系统算法实现          | 127 |
| 5.2.3 | 基于虚拟陀螺原理的双陀螺寻北系统算法精度分析        | 129 |
| 5.3   | 寻北实验验证                        | 130 |
| 5.3.1 | 基于虚拟陀螺原理的双陀螺寻北系统单次实验          | 130 |
| 5.3.2 | 单位置寻北实验                       | 130 |
| 5.3.3 | 多位置寻北实验                       | 132 |
| 5.4   | 虚拟陀螺敏感轴方向改变对双陀螺寻北系统的影响        | 133 |
| 5.5   | 本章小结                          | 136 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第 6 章 激光陀螺寻北仪环境适应性实验研究.....       | 137 |
| 6.1 阵风扰动环境寻北实验.....               | 137 |
| 6.1.1 阵风扰动情况激光陀螺测量误差特性 .....      | 138 |
| 6.1.2 单陀螺速率偏频激光陀螺寻北仪实验及精度分析 ..... | 139 |
| 6.1.3 三陀螺捷联寻北系统实验及精度分析 .....      | 141 |
| 6.1.4 双陀螺寻北系统实验及精度分析 .....        | 142 |
| 6.2 车载扰动环境寻北实验.....               | 144 |
| 6.2.1 车载扰动情况激光陀螺误差特性 .....        | 144 |
| 6.2.2 三陀螺捷联寻北系统实验及精度分析 .....      | 147 |
| 6.3 不同温度环境寻北实验.....               | 148 |
| 6.4 本章小结.....                     | 150 |
| 第 7 章 结论与展望.....                  | 151 |
| 7.1 总结.....                       | 151 |
| 7.2 研究展望.....                     | 152 |
| 参考文献.....                         | 153 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 背景及意义

### ► 1.1.1 高精度寻北仪技术背景及意义

未来战争是高技术条件下的信息化战争,精确制导武器的广泛使用成为战争的基本特征,远程精确打击和“非接触作战”成为主要作战样式。精确制导武器已经逐渐演化为现代战争的主导武器,成为加速战争进程、决定战争胜负的关键要素。

高精度寻北仪能够在复杂的战场环境下、在无法依赖外部信息的条件下,自主实时地测量载体自身位置的变化,准确确定当前位置,动态精确保持姿态基准<sup>[1]</sup>,可以为侦察系统、指挥控制系统、通信系统、情报分析系统等提供统一的自主的实时方向基准,为武器平台作战提供重要保障。因此,掌握高精度寻北仪技术对于发展我国陆用武器装备具有重要的意义。

### ► 1.1.2 寻北仪研究现状

根据寻北原理的不同,寻北方法可分为非陀螺寻北和陀螺寻北两大类。其中,非陀螺寻北方法主要有磁罗盘法和天文观测法两类。磁罗盘法通过测量地磁场来确定北向,受地球磁偏角、磁偏角变化和周围磁场的影响,通常精度较低;天文观测法通过观测星体来确定北向,可以达到很高的精度,但受气候条件和使用环境的影响,应用严重受限。近年来,加速度计寻北方法也有了一定的研究,其基本原理是通过加速度计进行旋转调制或角振动调制,利用哥氏效应测量地球自转角速度来确定北向,目前仍未见有高精度的报道。

陀螺寻北方法是惯性技术应用的重要成果之一,其基本原理是通过敏感地球自转角速度来确定北向,不依赖外部信息且工作不受自然条件的限制,属于一种完全自主的测量方法,得到了广泛的应用。

传统的陀螺寻北仪通常可分为两类:摆式陀螺寻北仪和解析式陀螺寻北仪。

摆式陀螺寻北仪利用陀螺仪的定轴性和进动性,通过给陀螺仪施加力矩,使陀螺相对真北方向作无阻尼振荡,主轴摆动的平衡位置即真北方位。通过将陀螺仪和经纬仪相结合,陀螺经纬仪可以实现在南北纬  $75^{\circ}$  范围内的任意地点的精确寻北。国内外对该类型寻北仪的研究和应用非常广泛,已研制生产出多种适合不同需要的产品,如表 1.1 所示。其中,最具代表性的是德国矿山机械研究所的高精度自动定向陀螺仪 GYROMAT2000,其寻北精度已达到  $3''$ ,寻北时间也缩短到 10min 以内<sup>[2,3]</sup>。

表 1.1 摆式陀螺寻北仪

| 产品型号        | 研制单位             | 寻北精度<br>/( $''$ ) | 寻北时间<br>/min | 备注  |
|-------------|------------------|-------------------|--------------|-----|
| GYROMAT2000 | 德国矿山机械研究所        | 3                 | 9            | 吊丝  |
| MARCS       | 美国利尔宇航设备公司       | 2                 | 10           | 吊丝  |
| GI-011      | 匈牙利 MOM 光学厂      | 3~5               | 30           | 吊丝  |
| IK30        | 乌克兰中央设计局         | 30                | 5            | 磁悬浮 |
| IT3         | 乌克兰中央设计局         | 3                 | 7            | 磁悬浮 |
| GG1         | 瑞士 WILD          | 20                | 20           | 吊丝  |
| TXC-1       | 中国航天发射技术研究所      | 20                | 8            | 吊丝  |
| JT15        | 徐州光学仪器厂          | 15                | 25           | 吊丝  |
| TJ-93       | 中国船舶工业总公司第 707 所 | 10                | 15           | 液浮  |

传统的摆式陀螺经纬仪具有精度高、机构轻便、全自动化等特点,在高精度寻北仪应用中占据了重要地位。但由于摆式陀螺经纬仪寻北时间通常较长,并且当使用环境存在扰动时寻北精度有所下降,在陆用武器装备应用中有一定的限制。

解析式陀螺寻北仪利用陀螺仪对地球自转角速度的测量,直接解析计算出真北方位。不同于摆式寻北仪,解析式陀螺寻北仪寻北过程不需要陀螺绕子午面摆动。受陀螺测量精度的限制,该类型寻北仪精度通常相对较低<sup>[2]</sup>,如表 1.2 所示。

表 1.2 解析式陀螺寻北仪

| 研制单位         | 寻北精度<br>/( $'$ ) | 寻北时间<br>/min | 备注   |
|--------------|------------------|--------------|------|
| 德国 TELDIX 公司 | 1                | 4            | —    |
| 韩国海军研究院电子工程部 | 3.4              | 5            | 光纤陀螺 |
| 美国空间实验室      | 0.5              | 7            | 气浮陀螺 |

(续)

| 研制单位         | 寻北精度<br>/(') | 寻北时间<br>/min | 备注   |
|--------------|--------------|--------------|------|
| 美国 Smiths 公司 | 7.8          | 3            | 动调陀螺 |
| 以色列飞机工业公司    | 3.4          | 5            | 动调陀螺 |
| 清华大学         | 0.3          | 30           | 静电陀螺 |
| 四川压电与声光技术研究所 | 3            | 5            | 动调陀螺 |
| 中国航天时代电子公司   | 3~5          | 5            | 光纤陀螺 |
| 中国航天发射技术研究所  | 4            | 4            | 动调陀螺 |
| 中国国防科学技术大学   | 1.8          | 5            | 激光陀螺 |

解析式寻北仪寻北时间较短,并且能够提供载体俯仰角和滚动角等姿态信息,但是其寻北精度目前还很难满足高精度寻北仪的应用需求。随着激光陀螺、光纤陀螺等各类陀螺测量精度的不断提升和对寻北算法的不断深入研究,解析式寻北仪具有较高的精度提升潜力。

此外,兼具寻北功能的捷联惯导系统(捷联寻北系统)也是陀螺寻北仪研究的一个重要方向。捷联惯导系统的初始对准结果通常可转换为载体坐标系相对于地理坐标系的3个姿态角,若能通过基准线将姿态信息传递给其它设备,则此时捷联惯导系统兼具了寻北功能。相比解析式陀螺寻北仪,由于捷联寻北系统包含3个陀螺和3个加速度计,通常可以达到更高的寻北精度,在抗扰动力上也有较大提高,同时捷联寻北系统还具有完整的导航功能,在陆用武器装备应用中有着广阔的应用前景。

## 1.2 激光陀螺寻北仪技术研究进展

激光陀螺具有启动快、动态范围宽、稳定性好、抗冲击振动和数字化输出等优点,如今已经广泛应用于海、陆、空、天等军用和民用领域,成为惯性导航与制导等系统的理想传感元件<sup>[4,5]</sup>。

以激光陀螺为核心器件的激光陀螺寻北仪,在快速反应、高精度、高可靠性、抗冲击振动等方面具有其独特的优势。随着激光陀螺测量精度的不断提高,激光陀螺寻北仪和激光陀螺捷联寻北系统技术研究,已成为高精度寻北仪研究的热点<sup>[6-16]</sup>。

根据寻北算法原理的不同,激光陀螺寻北仪技术研究主要可分为两类:解析式陀螺寻北仪技术研究和捷联惯导系统初始对准技术研究。其中,基于单方向

连续旋转的旋转调制技术是当前解析式陀螺寻北仪技术和惯导系统初始对准技术研究的重点。

### 1.2.1 解析式陀螺寻北仪技术

由解析式陀螺寻北仪的原理可知,寻北误差主要由陀螺测量误差决定。当寻北仪中的陀螺处于固定位置时,受陀螺零偏和其它随机测量误差的影响,通常很难达到满意的寻北精度。

针对不同陀螺类型<sup>[17-27]</sup>,在寻北仪使用环境<sup>[28-34]</sup>、陀螺误差补偿<sup>[10,30,35-37]</sup>、多位置寻北<sup>[25,38-40]</sup>、连续旋转寻北<sup>[12,19,41-49]</sup>以及寻北误差分析<sup>[20,50-55]</sup>等方面,国内外学者进行了非常广泛的研究。

二位置法使用旋转平台将陀螺旋转 $180^\circ$ ,通过得到两个位置的陀螺测量值,可以基本消除陀螺常值零偏的影响。卜继军<sup>[39]</sup>对二位置法的静态误差进行分析,研究了寻北误差与传感器误差、初始位置误差和转位误差等误差的关系;黄宗升<sup>[14]</sup>对二位置法进行改进,通过旋转定点采样方案在两个采样位置轮流采样,可以部分消除陀螺的零偏漂移,从而使寻北精度进一步提高。

在二位置法的基础上,通过增加更多的测量位置,形成了多位置法。与二位置法类似,多位置法也可以有效消除陀螺常值零偏的影响。当测量位置足够多时,在转动一周后由陀螺测量得到的地球自转角速度投影值形成一个正弦曲线,其峰值对应真北方向,通常采用曲线拟合的方法对真北方向进行求解。沈铖武<sup>[40]</sup>采用BP神经网络方法进行曲线拟合,并与最小二乘方法进行曲线拟合的结果进行比较,寻北精度得到较大改善。谢慕君<sup>[56]</sup>对多位置法的转位误差进行分析,得到转位误差与寻北误差之间的关系模型。

二位置法和多位置法的共同特点是采样时陀螺仪均处于静止状态,利用转动位置之间关系的约束,通过相应的寻北算法使陀螺仪的零偏误差得以有效消除,但对于陀螺零偏漂移和随机游走等测量误差的抑制效果并不明显。

为进一步提高寻北仪精度,基于旋转调制技术的连续旋转寻北算法研究有了一定进展。不同于二位置法和多位置法,连续旋转方法在采样时陀螺仪仍处于旋转状态,陀螺漂移误差被均匀调制在各个方向,通过对陀螺测量结果的解调可以使陀螺测量噪声得到更好的抑制,从而提高寻北精度。与多位置法相比,连续旋转寻北方法得到了多个周期的正弦曲线,测量信息也更为丰富,有利于更好地求解出真北方向。徐建华<sup>[42]</sup>研究了旋转调制式寻北仪的滤波技术,得到比二位置法更好的寻北精度;徐海刚<sup>[47]</sup>对旋转调制式寻北仪的误差进行分析,指出陀螺漂移稳定性是影响寻北精度的重要因素并对寻北精度进行了理论计算,通

过旋转调制方法提高了陀螺的等效精度,从而使寻北精度得以提高。

对于连续旋转寻北算法,转位误差和水平姿态角测量误差是影响寻北误差的重要因素,现有文献在该方面的研究相对较少,需要进一步对其进行深入研究。

## 1.2.2 捷联惯导系统初始对准技术

初始对准是确定惯导系统载体坐标系相对于某个参考坐标系的姿态关系的过程。对于捷联惯导系统,初始对准就是要确定初始时刻的姿态矩阵<sup>[57-59]</sup>。当参考坐标系选为当地地理坐标系时,捷联惯导系统的初始对准结果可转换为载体坐标系相对于地理坐标系的3个姿态角,与解析式陀螺寻北仪的寻北结果物理意义相同。对准精度和对准速度是初始对准的两项重要技术指标,对应到寻北过程,则可对应为寻北精度和寻北时间。

初始对准是惯导系统的关键技术之一,对惯导系统的导航精度有着重要影响,一直是国内外学者研究的热点。本书针对寻北问题进行研究,关于初始对准的研究主要对应于捷联惯导系统的自对准技术,因此,本文中所有涉及“初始对准”的表述,如非特殊说明,均指自对准技术。

典型的捷联惯导系统初始对准方法有解析对准、罗经对准以及最优估计对准等方法。由于重力矢量和地球自转角速度矢量在地理系中精确已知,通过陀螺和加速度计的测量,这两个不共线的矢量可被用于解析对准。由于基座运动的扰动和测量误差的存在,解析对准常用于静基座对准或动基座条件下的粗对准<sup>[60-62]</sup>。罗经对准是实现动基座精对准的方法之一,其基本原理是在水平对准和方位粗对准已实现情况下,由于方位失准导致地球自转角速度矢量在东向存在投影分量,引起北向轴不水平,从而可以利用北向速度误差来修正方位角,最终达到方位精对准<sup>[59]</sup>。

以 Kalman 滤波为代表的状态空间最优估计对准方法是当前初始对准研究的热点,可观性分析是其主要研究内容<sup>[57,63-85]</sup>。

系统可观性分析包括两个方面的内容:①确定系统是否完全可观测;②对不完全可观测系统,进一步分析哪些状态可观测,哪些状态不可观测以及状态的可观测度<sup>[75,86-90]</sup>。惯导系统在静态条件下可近似为线性定常系统,对于线性定常系统可以通过计算观测矩阵的秩进行可观性分析<sup>[91]</sup>,相对比较容易;针对静基座对准的特殊约束,Bar-Itzhack 和 Berman<sup>[63]</sup>从控制理论的角度出发,提出了简化的 INS 初始对准误差模型。Yeon Fuh Jiang<sup>[65]</sup>采用这种简化的初始对准误差模型,以水平速度信息作为观测量,通过详细的可观性分析,指出初始对