

“十三五”江苏省高等学校重点教材

Initial Alignment Theories and Methods for Strapdown Inertial Navigation System

捷联式惯性导航系统初始对准理论与方法

· 刘锡祥 程向红 编著 ·

科学出版社



“十三五”江苏省高等学校重点教材
重点教材编号：2018-2-177

捷联式惯性导航系统初始对准理论与方法

刘锡祥　程向红　编著

江苏高校品牌专业建设工程资助项目（PPZY2015B125）



科学出版社
北京

内 容 简 介

惯性导航作为一类自主导航技术手段，在航空、航天、航海以及车辆导航领域有着重要的应用。初始对准技术一直是惯性导航的核心和关键技术之一，对准精度、对准速度以及方法的稳定性在很大程度上决定了导航系统性能。本书系统地阐述了捷联式惯性导航初始对准的原理和方法，共分为10章，主要内容包括绪论、SINS导航解算与误差传播规律、初始对准的基本原理与方法、解析对准法、罗经法对准、组合对准、传递对准以及地磁场辅助解析对准等。

本书可作为导航相关学科的本科生、研究生的教学用书，以及专业厂、所、部队工程技术人员的技术参考书。

图书在版编目（CIP）数据

捷联式惯性导航系统初始对准理论与方法 / 刘锡祥，程向红编著. —北京：科学出版社，2020.3

“十三五”江苏省高等学校重点教材

ISBN 978-7-03-064628-6

Ⅰ. ①捷… Ⅱ. ①刘… ②程… Ⅲ. ①捷联式惯性制导 Ⅳ. ①V448.131

中国版本图书馆CIP数据核字（2020）第039198号

责任编辑：李涪汁 高慧元 / 责任校对：王 瑞
责任印制：张 伟 / 封面设计：许 瑞

科学出版社出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020年3月第 一 版 开本：720 × 1000 1/16
2020年3月第一次印刷 印张：11
字数：220 000

定价：88.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

前　言

惯性导航在军民领域发挥着越来越重要的作用。初始对准技术一直是惯性导航系统技术的核心问题和关键技术之一。本书以捷联式惯性导航系统初始对准技术为主要讨论对象，是作者及作者所在团队过去数十年里从事捷联式惯性导航系统技术教学、科研以及工程实践的总结和理解。

全书共分为10章：第1章为绪论；第2章介绍SINS导航解算与误差传播规律；第3章分析SINS初始对准的基本原理与方法；第4章和第5章讨论解析对准方法；第6章讨论基于经典控制理论的罗经法对准；第7章和第8章讨论基于现代控制理论的组合对准方法；第9章讨论传递对准技术；第10章介绍地磁场辅助解析对准技术。

本书得到江苏省品牌专业建设项目、江苏省优势学科建设经费项目以及国家自然科学基金项目的资助。感谢东南大学微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室全体老师和同学，感谢大家的工作为本书的完成奠定基础。实验室已毕业的闫捷博士、刘义亭博士、徐祥博士、王启明硕士仔细校阅了本书，并提出了许多宝贵意见，在此谨致深切感谢！感谢实验室在读研究生刘贤俊、马晓爽、黄永江以及沈航、祁艺、杨文强、郭小乐等同学对书中仿真与文字校对所做的工作。

惯性导航及对准技术涉及面广，历经近百年发展，理论和工程性均较强。写作过程中，作者弱化了复杂的理论分析推导而试图用简单直白的语言来描述对准问题与对准方法。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

作　者

2019年7月

目　录

前言
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　惯性导航系统与捷联式惯性导航系统 …… 1
1.1.1　惯性导航系统 …… 1
1.1.2　捷联式惯性导航系统 …… 2
1.2　惯性导航系统的初始对准 …… 3
1.2.1　初始对准问题的描述 …… 3
1.2.2　初始对准方法的综述 …… 4
1.2.3　初始对准中基座运动的定义与分类 …… 7
1.3　本章小结 …… 7
第 2 章　SINS 导航解算与误差传播规律 …… 8
2.1　引言 …… 8
2.2　地球描述与常用坐标系的定义 …… 8
2.3　SINS 导航解算算法 …… 10
2.3.1　SINS 姿态更新 …… 10
2.3.2　SINS 速度更新 …… 11
2.3.3　SINS 位置更新 …… 11
2.4　SINS 误差传播方程 …… 12
2.4.1　仪表误差模型 …… 12
2.4.2　姿态误差方程 …… 13
2.4.3　速度误差方程 …… 15
2.4.4　位置误差 …… 16
2.4.5　SINS 常用误差模型 …… 16
2.5　静止条件下的 SINS 误差模型 …… 17
2.5.1　误差模型与误差动态特性 …… 17
2.5.2　系统误差时域解 …… 20
2.6　本章小结 …… 23
第 3 章　SINS 初始对准的基本原理与方法 …… 24
3.1　引言 …… 24

3.2 初始对准的基本原理 ……24
3.2.1 姿态矩阵与失准角的描述 ……24
3.2.2 地球运动与初始对准的信息源 ……26
3.2.3 已对准设备与初始对准信息源 ……31
3.2.4 地磁场信息与初始对准信息源 ……32
3.3 初始对准的基本方法 ……33
3.3.1 数学解析法 ……33
3.3.2 反馈控制法 ……34
3.4 Kalman 滤波理论与方法 ……35
3.4.1 Kalman 滤波原理 ……35
3.4.2 非线性滤波器 EKF ……38
3.5 本章小结 ……40
第 4 章 基于双矢量定姿的静基座解析对准 ……41
4.1 引言 ……41
4.2 基于重力加速度与地球自转的解析粗对准 ……41
4.2.1 双矢量选择 ……41
4.2.2 解析粗对准的精度分析 ……43
4.3 基于重力视加速度的解析对准 ……46
4.3.1 基于重力视加速度的解析对准原理 ……46
4.3.2 基于重力视加速度的解析对准精度分析 ……48
4.3.3 双矢量定姿中矩阵病态性分析 ……51
4.3.4 两种解析方法的比较分析 ……53
4.4 基于重力视加速度解析对准的改进 ……54
4.4.1 基于重力视速度的解析对准方法 ……54
4.4.2 基于参数辨识与视加速度重构的解析对准方法 ……55
4.4.3 基于重力视加速度解析对准方法改进前后的比较 ……58
4.5 无纬度条件下的基于重力视加速度解析对准方法 ……58
4.5.1 基于重力视加速度无纬度解析对准基本原理 ……58
4.5.2 基于重力视加速度无纬度解析对准算法 ……59
4.6 本章小结 ……61
第 5 章 基于多矢量定姿的动基座解析对准 ……63
5.1 引言 ……63
5.2 导航坐标系速度辅助条件下的多矢量解析对准 ……63
5.2.1 运动基座条件下的比力方程与初始对准 ……63
5.2.2 基于四元数描述的多矢量定姿问题 ……66

5.2.3 Wahba 问题求解 ····· 67
5.3 载体坐标系速度辅助条件下的多矢量解析对准 ····· 69
5.4 本章小结 ····· 70
第 6 章 基于经典控制理论的罗经法对准 ····· 71
6.1 引言 ····· 71
6.2 静基座条件下的罗经法对准 ····· 71
6.2.1 水平精对准 ····· 71
6.2.2 方位精对准 ····· 75
6.2.3 罗经法对准参数设置 ····· 78
6.3 运动基座条件下的罗经法对准 ····· 80
6.3.1 基于外部速度/位置辅助的行进间罗经对准设计 ····· 80
6.3.2 运载体机动与回路参数设计 ····· 81
6.4 基于存储数据/回溯计算的罗经法对准 ····· 82
6.4.1 SINS 数学平台与数据回溯利用的原理 ····· 82
6.4.2 基于存储数据/回溯计算的罗经法设计与实现 ····· 83
6.5 本章小结 ····· 86
第 7 章 基于现代控制理论的组合对准 ····· 88
7.1 引言 ····· 88
7.2 组合对准的原理与方案设计 ····· 88
7.2.1 组合对准的基本原理 ····· 88
7.2.2 组合对准中状态量的选择 ····· 89
7.2.3 组合对准过程校正方式的选择 ····· 90
7.2.4 滤波参数的设计选择 ····· 92
7.3 基于运载体零速约束的组合对准 ····· 92
7.3.1 基于比力匹配的组合对准 ····· 93
7.3.2 基于零速约束的组合对准 ····· 97
7.3.3 零速约束条件下的比力匹配与速度约束方案比较 ····· 102
7.4 基于外部线运动信息辅助的组合对准 ····· 102
7.4.1 基于导航坐标系速度信息辅助的组合对准 ····· 102
7.4.2 基于位置信息辅助的组合对准 ····· 105
7.4.3 基于导航坐标系速度+位置信息辅助的组合对准 ····· 108
7.4.4 基于载体坐标系速度信息辅助的组合对准 ····· 109
7.5 组合对准与罗经法对准的比较分析 ····· 111
7.5.1 相似性分析 ····· 111
7.5.2 相异性分析 ····· 113

7.6 本章小结 …… 113
第 8 章 组合对准中的可观测性分析 …… 114
8.1 引言 …… 114
8.2 线运动匹配的组合对准中误差解析条件分析 …… 114
8.2.1 速度匹配基本原理 …… 114
8.2.2 速度匹配中的各状态量解析条件分析 …… 115
8.2.3 基于速度匹配的组合对准问题再分析 …… 119
8.3 本章小结 …… 122
第 9 章 基于现代控制理论的传递对准 …… 123
9.1 引言 …… 123
9.2 传递对准的基本原理 …… 123
9.2.1 传递对准中的时空一致性问题 …… 123
9.2.2 传递对准的匹配模式与机理 …… 124
9.3 主/子惯性导航系统之间信息空间一致性问题建模 …… 125
9.3.1 主/子惯性导航系统之间安装误差问题 …… 125
9.3.2 主/子惯性导航系统之间准静态挠曲变形 …… 126
9.3.3 主/子惯性导航系统之间高频挠曲变形 …… 126
9.3.4 主/子惯性导航系统之间杆臂效应 …… 128
9.4 测量参数匹配 …… 129
9.4.1 加速度计测量参数匹配 …… 129
9.4.2 陀螺仪测量参数匹配 …… 136
9.4.3 加速度计/陀螺仪测量参数组合匹配 …… 141
9.5 计算参数匹配 …… 142
9.5.1 姿态匹配 …… 142
9.5.2 速度匹配 …… 148
9.5.3 位置匹配 …… 148
9.5.4 速度+姿态匹配 …… 149
9.6 组合参数匹配 …… 151
9.7 舰载环境下基于速度+航向匹配的对准方案设计 …… 152
9.7.1 问题分析 …… 152
9.7.2 传递对准中的速度+航向对准方案 …… 152
9.8 本章小结 …… 155
第 10 章 地磁场辅助解析对准 …… 156
10.1 引言 …… 156
10.2 地磁场辅助解析对准方法及分析 …… 156

10.2.1　地磁场分布特点……156
10.2.2　地磁场辅助解析方位对准方法……156
10.2.3　地磁场辅助解析方位对准的精度分析……157
10.3　磁力计的误差分析与标定补偿……158
10.4　基于互补滤波方法的地磁场辅助解析对准……160
10.5　本章小结……160
参考文献……161

第1章 绪 论

1.1 惯性导航系统与捷联式惯性导航系统

1.1.1 惯性导航系统

导航是引导运载体从起始位置到达目标位置的过程，包括定位和引导两个过程[1-4]。本书讨论的捷联式惯性导航系统及初始对准技术主要涉及定位（包括速度、位置与姿态）问题。

定位是一个相对的概念。一般地，描述一个物体的运动需要引入参照物，即需要在参考坐标系中描述导航定位问题。在地表附近运动的运载体（如汽车、船舶等）常在当地水平地理坐标系中描述运载体的姿态和速度；并以当地水平地理坐标系原点在地球坐标系中位置来描述运载体的位置。本书以近地航行的舰船作为描述对象进行论述，后续章节均选择当地水平地理坐标系作为参考导航坐标系，并将其定义为理想导航坐标系。

理想导航坐标系本质上是一个数学定义，在结合地球重力加速度与自转角速度后，理想导航坐标系各轴具有明确物理含义。但理想导航坐标系只是一个定义，无法直接加以利用。惯性导航系统（inertial navigation system，INS）使用机电平台（定义为机电导航坐标系）来模拟理想导航坐标系，并使用三轴环架机构来隔离机电平台与运载体之间的角运动，如图 1-1 所示。当机电平台各轴与理想导航坐标系各轴重合时，对安装在机电平台上的加速度计测量值进行导航积分可获取运载体的速度变化；对速度进行积分可获取位置变化；拾取环架

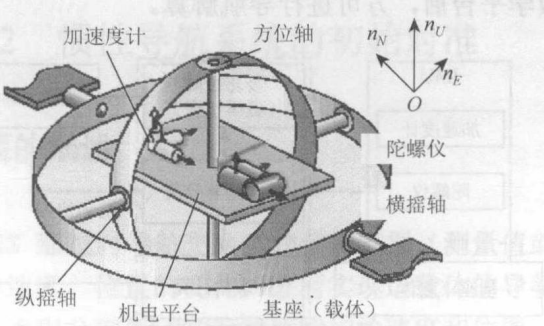


图 1-1 平台式惯性导航系统示意图

机构各轴夹角可获取运载体姿态。基于机电平台的 INS 通常称为平台式惯性导航系统（gimbal INS，GINS）。

GINS 积分工作方式存在一定的前提条件：导航工作前，GINS 需要已知运载体初始速度、位置，并需要通过某种方式驱动机电平台各轴，使其重合并稳定于理想导航坐标系；导航工作中，GINS 需要通过某种方式驱动机电平台跟踪变化的理想导航坐标系，以解决导航坐标系的经纬度相关性问题[5-7]。上述前提条件具体可称为 GINS 初始对准和导航解算，主要利用陀螺仪、加速度计以及导航控制算法来实现。具体可分为传感器与算法两个主要部分，其中陀螺仪和加速度计分别用来测量运载体角速度与线加速度，而算法主要进行导航解算以及获取控制指令。

在 GINS 中，最初的陀螺仪和加速度计均服从经典牛顿力学定律，通常被称为惯性仪表，这也是该类导航系统被称为惯性导航系统的主要原因。随着惯性器件技术的发展，陀螺仪和加速度计已从机械式，走向微机械、光学、量子器件，其工作机理已不再局限于经典牛顿力学定律，但此类基于角速度与线加速度测量的导航系统仍被称为惯性导航系统。

1.1.2　捷联式惯性导航系统

在惯性技术漫长的发展历程中，先后出现了两类典型的 INS，即 GINS 和捷联式惯性导航系统（strapdown INS，SINS）。两者的区别主要在于：①仪表安装方式不同，GINS 中惯性仪表安装在机电平台上，而 SINS 中惯性仪表测量组合体（inertial measurement unit，IMU）安装在载体上（图 1-2），两种安装方式下惯性仪表测量值具有不同的含义；②导航坐标系实现方式不同，GINS 使用机电平台来模拟导航坐标系，而 SINS 则使用数学平台（定义为计算导航坐标系）来模拟；③陀螺仪和加速度计测量的范围不同，平台式系统工作在伺服状态，平台隔离了运载体的角运动，传感器的测量范围可设计得很小；而捷联式系统传感器直接测量载体运动，因此需要的测量范围大。在图 1-2 所示的 SINS 中，当且仅当仪表测量值被投影到数学平台后，方可进行导航解算。

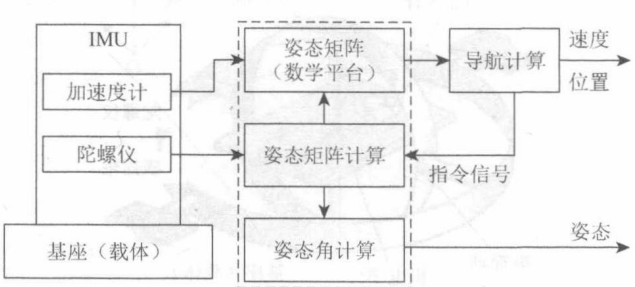


图 1-2　捷联式惯性导航系统示意图

SINS中采用的数学平台本质上是一种数学定义，必须借助于其他参考坐标系进行描述。安装有陀螺仪和加速度计的运载体（定义为载体坐标系）成为描述数学平台的一种理想参考选择，SINS通过描述计算导航坐标系与载体坐标系之间的方向余弦矩阵（direction consine matrix，DCM）来描述数学平台。上述DCM也常称为姿态矩阵。在获取姿态矩阵后，SINS将载体坐标系中的加速度计测量值投影到数学平台，得到导航坐标系中的运载体加速度。对导航坐标系中的加速度投影值进行导航积分后可获取运载体的速度变化；对速度导航积分后可获取位置变化；从姿态矩阵中可解析提取载体坐标系相对于导航坐标系的姿态角。

与GINS类似，SINS在导航作业前需要已知运载体的速度、位置，并建立计算导航坐标系与载体坐标系之间的DCM；进一步的导航工作中，计算导航坐标系需要跟踪因运载体运动引起的理想导航坐标系的变化。上述工作同样由陀螺仪、加速度计以及导航控制算法完成。但不同于GINS，SINS中惯性仪表被安装在运载体上，运载体机动过程中的姿态变化无法被隔离，因而SINS导航算法中DCM的更新同时包括两个过程：①对理想导航坐标系的跟踪；②对载体坐标系的跟踪。

需要注意的是，惯性仪表测量值在GINS与SINS中有着不同的含义。在GINS中，仪表测量值表示机电平台相对于惯性空间的运动；而在SINS中，仪表测量值表示运载体（载体坐标系）相对于惯性空间的运动。从导航解算的角度看，GINS直接使用惯性仪表测量值进行导航解算，而SINS使用仪表测量值在导航坐标系中的投影值进行导航解算。SINS中加速度计测量值在数学平台上的投影值与GINS中加速度计测量值具有相同的物理含义；SINS中陀螺仪测量值在数学平台上的投影值在补偿载体角运动后与GINS中陀螺仪测量值具有相同的物理含义。

若仅从导航平台数据处理的角度看，SINS与GINS两者原理相同。本书主要针对SINS初始对准原理和方法进行讨论。为了便于讨论，后面章节将GINS导航平台上的仪表测量值与SINS导航平台上的仪表投影值统一称为仪表投影值；并将机电导航坐标系和计算导航坐标系统称为计算导航坐标系。

1.2 惯性导航系统的初始对准

1.2.1 初始对准问题的描述

上述分析表明，INS通过对导航平台上的仪表数据（测量值或投影值）进行导航积分来获取运载体速度、位置的变化，进而实现运载体的导航定位。显然，要达到定位的目的，上述积分需要已知运载体的初始速度和位置。当前获取运载体初始速度和位置的方法相对较多，也比较成熟，例如，运载体静止时速度为零；

运载体从已知地标点出发时，经纬度已知；装备有卫星导航定位系统（global navigation satellite system，GNSS）的运载体，可同时获取速度、位置参考值。

与此同时，上述积分建立在导航平台各轴与理想导航坐标系各轴重合的基础上，即要求 GINS 中机电平台已经扶正或 SINS 已完成初始 DCM 计算。后面章节将机电平台扶正或初始 DCM 计算统称为导航平台准备。当且仅当导航平台（机电导航坐标系或计算导航坐标系）与理想导航坐标系之间的误差角（定义为失准角）足够小时，方可进行导航工作。上述导航平台扶正/初始 DCM 计算与初始速度、位置的获取过程一起称为 INS 的初始对准。但与初始速度、位置获取过程相比，导航平台扶正/初始 DCM 计算过程，尤其方位对准过程较为困难，因而狭义的 INS 初始对准常指导航平台准备[5-13]。

进一步，从前面分析及图 1-2 所示过程来看，加速度计零偏在导航积分过程中随着时间增长而无限累积，直接表现为速度与位置误差；并进一步带来导航平台控制指令信号误差。导航平台控制指令信号误差与陀螺仪零偏在导航平台调整稳定过程中将引起平台歪斜，从而带来加速度计投影值误差，导航积分后表现为速度与位置误差。因而对于执行长时间、远距离任务的 INS（如舰载 INS），需要在导航工作开始前，对包括惯性仪表零偏在内的各类误差进行标定，即所谓的系统级标定，以保证其长期导航精度。本书讨论的 SINS 初始对准主要涉及初始 DCM 计算与仪表误差估计两个方面，后面章节将针对导航平台准备与仪表误差估计两个问题展开。

GINS 与 SINS 两者基本原理类同，初始对准原理方法也有共同之处。现有 SINS 对准技术大都源于 GINS 对准技术。但注意到 SINS 有着自身特点——数学平台具有虚拟性，虚拟的数学平台不具有机电平台的质量、阻尼与弹性等物理属性。因而对数学平台的调整可采用与 GINS 类似的方法，逐步调整来完成；也可以通过参数设置或解析的方式，一步完成。

1.2.2　初始对准方法的综述

1. 粗对准

初始对准是为了建立导航积分的初始条件。从对准过程看，初始对准可以分为两个主要过程——粗对准和精对准。

粗对准的主要目的是提供粗略的姿态信息，为后续精对准提供基础。粗对准结果一般要求失准角为小角度，进而保证误差传播方程满足线性条件假设。当前，一般采用基于双矢量定姿的解析对准方法来完成粗对准[14-24]。

基于双矢量定姿的解析对准方法一般选择地球自转角速度与重力加速度作为不共线的两个矢量，构建相关矩阵方程完成解析对准。这是一种几何方法，可以直接获取载体坐标系相对于导航坐标系的姿态矩阵。陀螺仪测量值中同时包含了

地球自转角速度与载体相对于导航坐标系的角速度信息，因而基于地球自转角速度与重力加速度的双矢量定姿算法精度有限，且易受晃动干扰。一般地，在载体晃动较弱时，可采取求均值的方法来提高陀螺仪输出的信噪比；但在载体剧烈晃动时无法进行解析对准。

2000年，针对晃动基座条件下的初始对准问题，业内学者提出了一种基于重力视加速度的解析对准方法。该方法将姿态矩阵进行链式分解，将初始对准问题归结为求解初始时刻载体坐标系相对于初始时刻导航坐标系的姿态矩阵问题，并通过在惯性空间中选择两个不同时刻的重力视加速度作为双矢量。该方法通过跟踪载体坐标系相对于惯性空间的角运动，有效避免了载体晃动干扰问题。跟踪过程中，陀螺仪噪声被平滑，而加速度计测量噪声则被投影到惯性空间中，直接参与解析对准。针对加速度计测量噪声问题，业内分别提出了基于重力视速度、重力视加速度辨识与重构的解析对准方法。

但基于视运动的解析对准方法并没有解决陀螺仪零偏与加速度计零偏的估计问题，其对准精度仍受制于仪表误差；且因对准过程需要对仪表数据进行积分，由此还带来了误差累积与对准时间增加问题。

2. 精对准

精对准是在粗对准的基础上进一步调整导航平台，以缩小导航平台与理想导航坐标系之间的差异。

罗经法对准是一类广泛应用的、成熟的对准方法。该方法采用了反馈调整思想，以失准角带来的速度误差为输入，以经典控制理论中的比例积分控制为手段计算平台调整指令，驱动平台旋转以减小速度误差，并通过反馈、调整，逐步完成导航平台的扶正[25-40]。该方法不对仪表误差进行估计，对准精度受制于仪表精度。在罗经法对准中，罗经回路参数与对准精度无关，但关系到对准过程的动态特性，如何在最短的时间内逼近对准的极限精度是该方法的研究重点。

基于现代控制理论的组合对准是另一种常用的对准方法。该方法通过精确描述SINS中各误差的传播规律，以Kalman滤波及其改进方法为数学工具，从部分误差（如速度、位置或（和）姿态误差）的量测值中反演得到SINS各误差。SINS中各误差源大都不能直接被观测，需借助精确的误差传播模型来进行间接观测和估计[41-57]。现有的SINS线性模型较为成熟，但需要以较精确的粗对准结果作为保证。

在SINS误差模型的线性性不能精确保证时，组合对准需要从两个方面进行处理：一是建立完整的非线性误差模型；二是采用非线性滤波方法。前者如大失准角误差模型；后者如扩展Kalman滤波、无迹Kalman滤波以及粒子滤波等。在Kalman滤波器估计出SINS误差后，一般可采用两种方式进行校正：一是将误差

估计值返回到 SINS 中进行各类误差补偿，并以补偿后的导航参数与仪表测量值作为后续导航的基础和输入，即闭环校正；二是在初始对准结束后，对各类误差进行一次性校正，即开环校正。在误差可观测条件下，闭环校正同样采用了反馈调整思想，可以逐步缩小失准角，从而满足线性假设；而开环校正可以避免反馈过程中因状态量不可观测或可观测度弱，以及滤波振荡带来的负面影响。

虽然罗经法对准与组合对准均采用反馈调整思想，但两者的内在机理不同：前者以上述速度误差作为反馈信号，基于经典控制理论设计反馈控制回路来逐步校正失准角，直至失准角引起的仪表信息差异或导航参数差异完全消除或足够小；后者以上述速度（或其他）误差作为量测值，根据失准角误差、仪表误差传播规律，利用现代控制理论设计滤波器，从误差量测中反演失准角等误差并进行校正，直至仪表信息差异或导航参数差异完全消除或足够小。

在基于反馈调整的精对准过程中，对准精度与对准速度是一对永恒的矛盾。对准精度需要对准时间来保证。近年来，业内针对该问题，结合 SINS 数学平台与仪表数据特点，提出了一种基于存储数据的回溯对准方法，该方法可在不改变对准机理的条件下，改变数据处理方法，利用计算机的高效计算能力缓解上述矛盾。

3. 传递对准

传递对准是一种待对准 INS 利用已对准高精度 INS 完成初始对准的方法。该方法要求已对准与待对准 INS 安装在同一运载体平台上，以进行同一个（组）物理量的测量。传递对准一样分为粗对准和精对准两个过程。粗对准过程直接利用已对准 INS 导航信息装订待对准 INS；而精对准则是以两个 INS 相关信息差值为量测，以 Kalman 滤波及其改进算法为数学工具，从误差观测中反演 SINS 各误差[58-92]。

从两个 INS 被比较的信息角度看，传递对准可以分为测量参数匹配、计算参数匹配以及混合参数匹配。测量参数匹配直接进行仪表测量值的比较；计算参数匹配进行包括速度、位置与姿态在内的参数比较；而混合参数匹配则兼顾测量参数和计算参数的比较。

传递对准中，因两个 INS 使命任务不同，常被安装在运载体的不同部分，两个 INS 信息在比较前首先需要进行时空一致性的统一，即从量测信息中剔除因两台设备时空差异引起的差异信息。

4. 地磁场辅助对准

上述解析粗对准、罗经法对准、组合对准以及传递对准通常需要陀螺仪满足一定精度和分辨率，如能够测量千分之一的地球自转角运动信息。对于低精度微机电陀螺仪（MEMS-Gyro）而言，这是一个难以完成的任务。在此条件下，地磁场

提供了一类辅助对准方法。在静止条件下，该方法利用重力加速度计测量值来完成水平对准；进一步利用水平对准值将地磁场测量值投影到水平坐标系中，进行方位解析对准，获取磁北信息；在进行磁偏角补偿后，可获取地理北信息[93, 94]。

1.2.3 初始对准中基座运动的定义与分类

初始对准中，不同的对准方法有着不同的使用条件和适用范围。从对准过程中基座的运动情况看，INS 对准可分为准静基座对准与动基座对准。

在 GINS 中，惯性仪表安装在机电平台上，环架机构隔离了运载体的晃动。因而对于 GINS 而言，判断基座是否运动，仅需要考虑运载体是否存在线运动。

但在 SINS 中，惯性仪表直接安装在运载体上。由于环境干扰等原因，如振动与晃动，理想的静基座并不存在。因而对 SINS 而言，可近似认为对准过程中，基座总是处于运动或准运动状态。判断 SINS 基座是否运动，需要同时考虑运载体的角运动和线运动。若从导航平台的角度看，无论 SINS 还是 GINS，导航平台主要用于模拟理想导航坐标系，均可隔离运载体的角运动。

为了便于讨论，基于 SINS 与 GINS 两者原理类同、数学平台与物理平台功能相同的认识，本书定义准静基座为导航平台没有线运动，而动基座为导航平台存在线运动。也就是说，评价基座运动与否的标准在于导航平台是否有线运动。若运载体处于摇摆但无线运动状态，视为准静基座。

1.3 本 章 小 结

本章比较了 GINS 与 SINS 的异同点，分析认为：SINS 中惯性仪表安装在载体坐标系中，当且仅当仪表测量值投影到计算导航坐标系后方可参与导航解算；从导航平台的角度来看，GINS 中的仪表测量值与 SINS 中的仪表投影值具有相同的物理含义。

本章分析了 INS 初始对准的目的需求，分析认为：SINS 初始对准应包括初始姿态矩阵计算和仪表误差标定两个部分；总结了 SINS 对准的基本程序步骤，介绍了粗对准、罗经法对准、组合对准、传递对准以及地磁场辅助对准等相关技术。

第 2 章　SINS 导航解算与误差传播规律

2.1　引　　言

SINS 导航解算是在初始对准完成的基础上利用陀螺仪和加速度计测量值实时更新姿态矩阵、速度和位置的过程，初始对准是 SINS 导航解算的前提和基础。但从初始对准的角度看，仪表测量值与导航参数又是 SINS 初始对准可能的信息源。本章重点讨论 SINS 导航解算以及 SINS 误差传播规律，以提供初始对准的基础。

2.2　地球描述与常用坐标系的定义

如前所述，近地航行的运载体一般选择当地水平地理坐标系作为参照；地球作为一个不规则的椭球体，描述当地水平地理坐标系的参数大多为地球形状的函数。与此同时，重力加速度等关键参数也与地球形状密切相关。因而研究 SINS 导航解算首先需要分析地球的形状特征以及对应的力学特征。

为简化讨论，本书假设在有限的对准时间内，运载体的位置变化很小，因而可以忽略地球形变与重力变化。本书后面的分析和讨论过程中忽略地球形状变化，并假设地球为一规则圆球。SINS 用地球相关参数描述如下：地球半径 R 为 6371000m，重力加速度 g 为 9.8m/s^2，地球自转角速度 ω_{ie} 为 15°/h。为便于后面分析讨论，列举惯性导航系统常用坐标系如下。

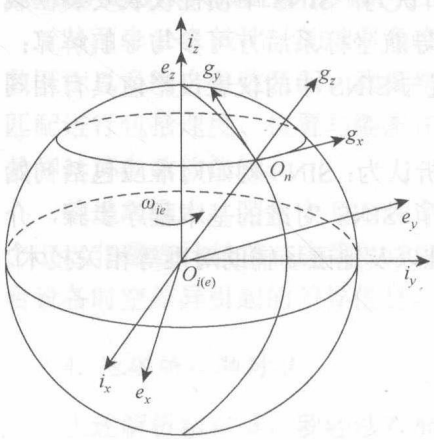


图 2-1　惯性、地球与当地水平地理坐标系关系示意图

（1）地心惯性坐标系 i：如图 2-1 所示，原点位于地球中心点，i_z 轴指向地球自转方向，i_x 轴与 i_y 轴相对惯性空间（以太阳为参考）稳定，三轴满足右手定则。该坐标系不随地球转动而转动。

（2）地球坐标系 e：原点位于地球中心点，e_z 轴指向地球自转方向并通过地球北极点，e_x 轴穿越本初子午线与地球赤道的交点，e_y 轴穿越东经 90°子午线与地球赤道的