

惯性导航基础

第六部分——惯性系统测试与标定

西北工业大学航天学院

罗建军

惯性导航基础

- 第一部分 惯性导航概述（相关概念）
- 第二部分 捷联惯性导航系统的基本原理
- 第三部分 捷联惯导系统计算
- 第四部分 惯导系统的对准
- 第五部分 惯导系统的误差分析
- 第六部分 惯性系统的测试与标定

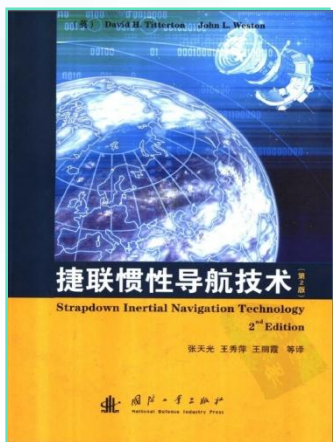


6 惯性系统的测试与标定

➤ 测试目的、分类和测试内容

➤ 标定的概念和标定方法

➤ 误差补偿



第二章 惯性导航

2.1 惯性导航中所用的参考坐标系 ...

2.2 惯性敏感器与惯性测量组合

2.3 惯性导航的姿态计算和导航计算

2.4 惯性导航系统的误差分析

2.5 惯性导航系统的对准

2.6 惯性系统的测试与标定

第8章 测试、标定和补偿

2.6 惯性系统的测试与标定



6.1 惯性导航系统的测试—测试目的

为了检验和确定惯性敏感器和惯性导航系统对给定应用的适用性，即保证它们的特性和性能能满足应用需求，需要对惯性敏感器、惯性测量组合或惯性导航系统进行评估测试和试验。

惯性仪表测试通常是指在实验室条件下，将惯性装置测试设备产生的各种激励作为仪表的输入，然后经数据采集系统获取仪表的输出，通过数据处理来**确定仪表的性能参数或从数据中分离出仪表的误差模型系数**。所以，**惯性测试技术一般包括惯性仪表的误差机理分析与建模、惯性装置测试设备的研制与测试环境的控制、试验方法的设计、数据采集与处理、误差模型系数辨识方法、评价与补偿等内容。**



6.1 惯性导航系统的测试—测试目的

惯性仪表测试目的是解释仪表误差的产生机理，准确、客观、全面地评价仪表的性能，对仪表的设计、制造和使用提供指导和依据。惯性仪表测试贯穿于仪表设计、制造和使用的全过程，一般可分为研究性测试、鉴定性测试和应用性测试。

惯性敏感器和惯性系统测试的主要目的是**估计惯性仪表（敏感器）误差公式中的系数和各种误差项**，从而可以预测具体应用环境下敏感器和系统的性能。同时，在确定了系统误差特性曲线或者敏感器的性能之后，就能**对系统误差进行补偿，以提高敏感器或系统的精度。**



6.1 惯性导航系统的测试—测试目的

惯性敏感器和惯性系统测试的主要目的是**估计惯性仪表（敏感器）误差公式中的系数和各种误差项**，从而可以预测具体应用环境下敏感器和系统的性能。同时，在确定了系统误差特性曲线或者敏感器的性能之后，就能**对系统误差进行补偿，以提高敏感器或系统的精度**。

所谓**标定**就是通过比较陀螺仪、加速度计的输出值与已知的输入运动或基准信息，确定误差模型或测量模型的误差系数，使输出在其取值范围内符合使用要求的过程。惯性系统标定的主要目的是分离惯性敏感器的误差模型系数，以便使用测量模型对其输出进行补偿，提高惯性导航的精度。因此，误差系数的标定精度直接影响误差补偿的效果和惯性导航的精度。



6.1 惯性导航系统的测试—测试目的

惯性敏感器和惯性系统测试的主要目的是估计惯性仪表（敏感器）误差公式中的系数和各种误差项，从而可以预测具体应用环境下敏感器和系统的性能。同时，在确定了系统误差特性曲线或者敏感器的性能之后，就能对系统误差进行补偿，以提高敏感器或系统的精度。

惯性仪表测试以能精确地描述仪表性能的模型方程为基础。

测试过程应能够精确地测量或激励模型方程的系数。通过测试所获得的方程应能够准确反映仪表在给定试验条件下的特性，并对仪表的未来工作状态给出准确的预测。



6.1 惯性导航系统的测试—测试目的

测试和试验的另一目的是标定输出信号，并了解该装置在各种条件、环境下的性能。

完成测试过程后，通常还要对惯性敏感器或系统进行温度、离心、振动等试验，目的是在符合实际使用所期望的动态条件范围内对系统性能进行检验。

要求敏感器和系统不仅能在运载体所产生的振动、冲击和加速度环境中可靠地工作，并且在试验与标定过程中具有足够的耐久性和承受能力；要求测试和标定的方法不仅需要反映出应用的类型，更重要的是要反映出敏感器和系统所处的实际工作环境。



6.1 惯性导航系统的测试—测试分类

1. 对敏感器的测试通常可分为三类：**鉴定测试**、**验收测试**和**可靠性测试**。鉴定测试是对敏感器进行最大范围和最严格的测试。目的是检验某种设计能在满足用户要求的前提下，在生产时留有一定裕度。验收测试是在敏感器生产过程中进行，目的是检验某些参数并为敏感器标定时提供数据。可靠性测试则是从一批成品中随机抽取一些敏感器，并让它们在标准工作条件下试运行来得到平均故障间隔时间。可以对每个敏感器都检测或根据统计原理在生产过程中从一批成品中选取一定数量进行检测。
2. 敏感器及其系统的测试和试验方式分为**静态试验**和**动态试验**两种。在**静态试验**中，装置保持固定，实验者采用多位置测试观察由于某些自然作用或自然现象引起的反应。例如由地球重力而产生的比力可用加速度计在不同的方位观测。当进行**动态试验**时，被测装置处于运动状态，实验者监测该装置对给定激励的反应，并将其与外界激励作比较。

6.1 惯性导航系统的测试—测试分类

在惯性仪表的地面试验中,激励是对惯性仪表实际使用环境特征进行的物理模拟,它通过特定的设备以一定的规律产生,并作为输入量施加在仪表上,用于在试验中测试和评估惯性仪表的性能。激励的作用就是要能够有效激发仪表的内在特性,并通过合理设计的试验方法重构误差模型,分离和标定仪表重构误差模型的系数。在惯性仪表性能评估的各种试验中,要求激励必须是可控的,并能在仪表的工作范围内为仪表提供尽可能精确的输入信号,满足高精度仪表的测试要求。



6.1 惯性导航系统的测试—测试内容

惯性测量装置或整个惯性导航系统的测试通常包括：静态加速度测试、静态速率测试、角度测试和惯性测量装置或导航系统的多位置测试

(1) 静态加速度测试：将导航系统安装到水平台上，使其每个敏感轴分别指向上、下或特定方位，该测试有可能得到相对于一组基准安装面的加速度计零偏、标度因数误差和敏感轴安装误差的估计。这些估计值可以通过对各种组合的加速度计测量值求和及求差计算得到。

(2) 静态速率测试：通过检测系统在预先设定的时间周期内，以及该装置多个不同的安装方向所给出的角速率测量值，有可能从中得出陀螺仪固定零偏和与 g 相关的零偏。与静态加速度测试一样，采用求和及求差的方法可以分离和计算各种误差分量。



6.1 惯性导航系统的测试—测试内容

(3) 角度测试: 该测试采用一台精密多位置测试转台, 使惯性测量装置转动非常精确的已知角度, 通过对这些已知的旋转角度与由陀螺仪给出的速率输出积分导出的这些旋转角度的估值进行比较, 就可以求出陀螺仪测量值中各种误差的估值。例如, 如果转台顺时针和逆时针方向旋转过相同的角度, 陀螺仪对于壳体安装误差的估值连同陀螺仪零偏和标度因数误差就可以求出。

(4) 惯性导航系统多位置测试与标定: 该测试把敏感器的误差, 转换为在导航参考坐标系中的加速度和角速度分量的误差, 求取捷联系统中大部分主要敏感器误差的估计。

6.1 惯性导航系统的测试—测试内容

(5) 惯性导航系统的半物理仿真测试：这种形式的测试通常用于项目的研发阶段，目的是对飞行器的导航、制导和飞行控制性能进行准确地估计。通常将完整的惯性导航系统安装到测试设备上。该测试设备可以精确地再现系统在工作寿命期内可能经受的角运动，如导弹的飞行姿态变化。一般说来，测试设备仅限于作角运动，而线运动通过特殊的模拟方法产生。被测器件的信号输出通过合适的接口连接到仿真运载体的运动和性能分析计算机上；计算机上的数学模型产生输出信号以控制测试设备，从而形成一种采用实际的硬件并实时运行的仿真系统；对复杂系统在各种飞行状态下的真实性能进行测试和评估。



6.1 惯性导航系统的测试—测试内容

惯性导航系统通常还要进行温度、速率、离心、摇摆、冲击及振动等环境和力学试验，目的是在符合实际使用所期望的动态条件范围内对系统性能进行评估。常见的环境和力学试验项目有：

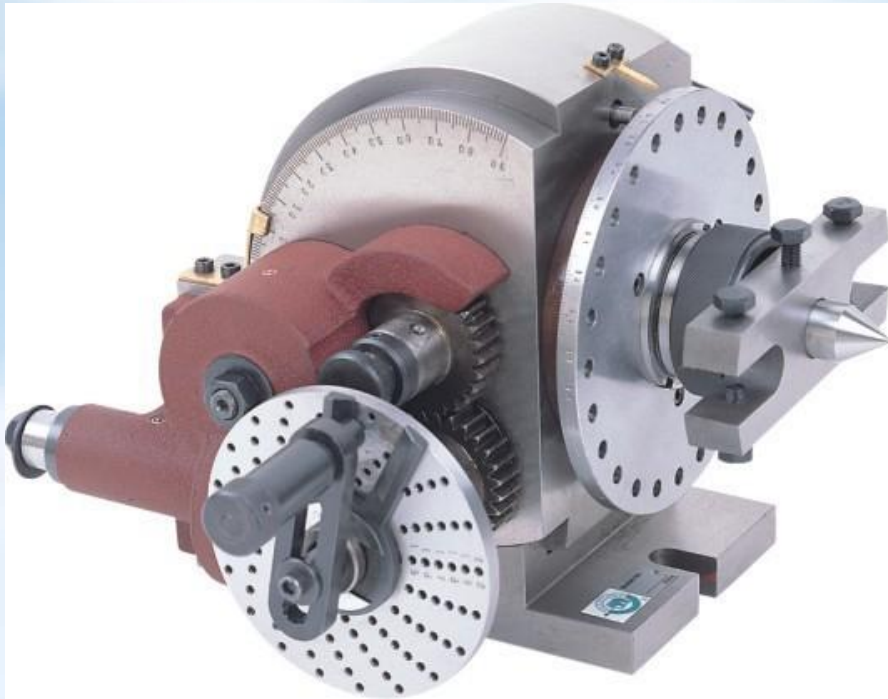
- (1) 温度试验：确定产品在要求的温度及湿度条件下的适应性。
- (2) 摇摆试验：测定陀螺仪的频响特性和与之相关联的电子控制电路对角振荡加在传感器输入轴上时的频响特性。
- (3) 离心试验：考核设备承受预计的使用加速度环境的能力，以确保在此环境下的设备结构和性能不发生破坏和失灵。
- (4) 冲击试验：测量敏感器对外加冲击的响应，并且保证敏感器在承受此瞬间加速度之后（一般时间仅以毫秒计），有足够的弹性恢复力。与离心试验相同，被测敏感器可保持运行状态也可处于静止状态。
- (5) 振动试验：确定所设计、制造的设备、构件，在运输、使用、工作过程中能承受外来振动而不致破坏，并发挥其性能，达到预定寿命的可靠性。



6.1 惯性导航系统的测试—测试设备

1. 测试和试验方法需要特制、精密且造价昂贵的设备，它们通常安装在为此目的特建的实验室中。通常需要用特制的地基，使试验设备隔离当地环境中产生冲击振动及其它扰动。
2. 常见的测试和标定设备有：各种惯性仪表及系统的综合测试台、可调平的平板、多面体的工装倾斜台、晃动台、摇摆台、伺服转台、角振动台、单轴速率转台、精密三轴转台、计时测频仪以及各种自动化测试设备等。常用的环境试验设备有温度试验箱、老化设备、离心机、冲击台、振动台等。
3. 测试不仅要符合应用所需的规程和方法，而且要保证测试设备与期望的测试精度相适应。这样才能给惯性器件或系统施加给定和已知的激励并对其响应加以观测。一般来说，测试设备的测量精度应明显超出被测试敏感器的测量精度，典型的量级为5倍~10倍。类似地，数据采集系统及处理这些数据的算法也必须与敏感器或其应用所期望的精度相适应。另外，测试设备应定期进行必要的校准和检查。







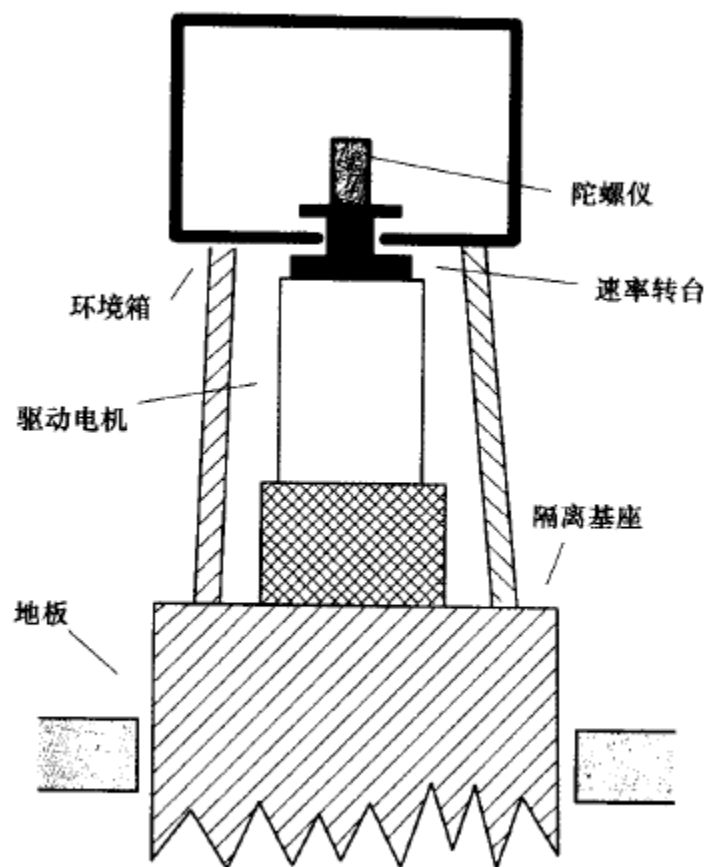
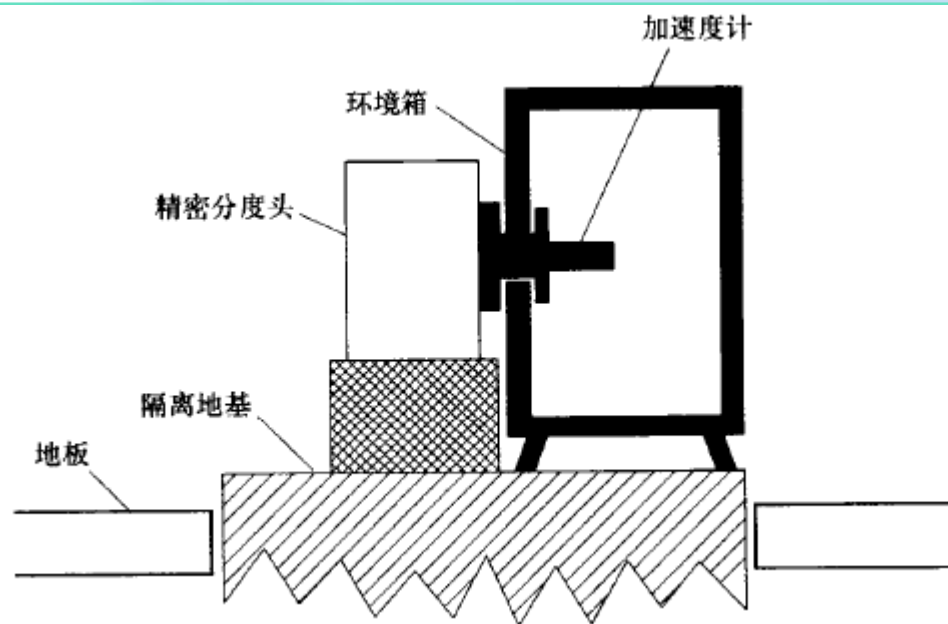


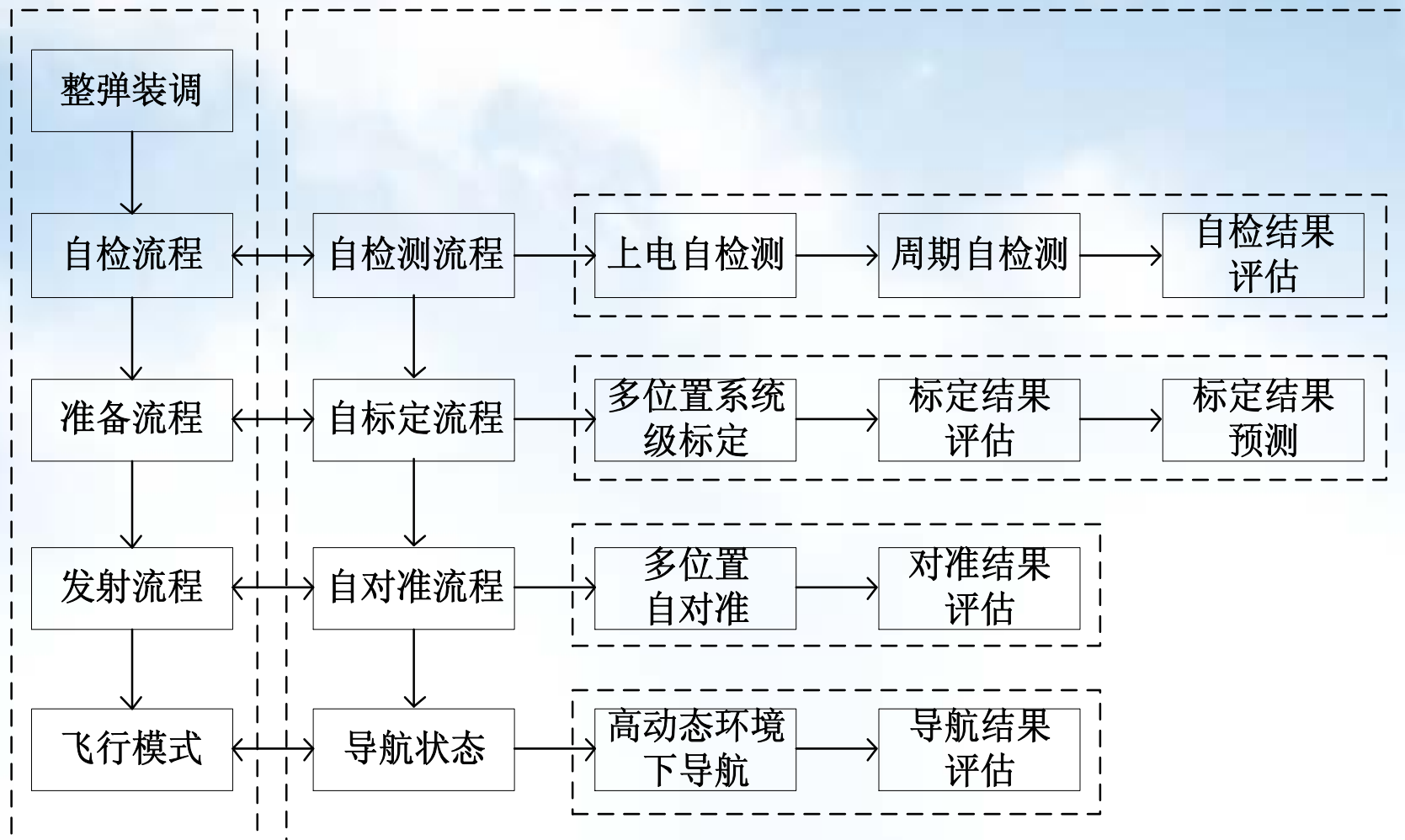
图 8.8 温度试验设备示意图



弹载“三自”SINS的工作流程

导弹发射流程

捷联惯导系统工作流程



『 自检测技术和健康管理的研究』

自检测分为在线自检测和离线自检测。

典型的方法有：故障树检测法、神经网络检测法、模糊数学检测法以及专家系统检测法等。

健康管理是指捷联惯导系统实现标定参数稳定性预测、健康诊断和故障管理、剩余寿命预测的技术。从历史实验数据建立设备寿命历程曲线和报废时刻，利用预测参数值估计系统状态，在此基础上估计系统的剩余寿命。

『自标定技术的研究』

分立标定法：分立标定方法直接利用惯性仪表的输出作为量测量，与已知的基准信息进行比较从而确定误差参数；

优点：原理简单，技术成熟。

缺点：反复拆装，费时费力；标定环境要求高，快速性和机动性差。

系统级标定法：利用惯性仪表的输出进行导航解算，建立导航误差与惯性仪表误差参数之间的关系，以导航误差作为量测量来辨识误差参数。

优点：可现场标定；可自标定；无需高精度转台等设备。

缺点：现有方案的位置编排均存在位置冗余和编排不合理问题，部分标定方案参数不完全可观测。

『自对准技术的研究』

自对准：利用惯导系统自身的输出信息、所在地的纬度和重力加速度信息，按照惯导系统的误差模型，对姿态角误差进行辨识。对准过程通常包含粗对准和精对准。按照对准位置分为单位置和多位置对准。

单位置的自对准：对准精度受制于惯性仪表自身的精度水平，除非采用高精度的惯性仪表，否则很难提高对准的精度；

两位置自对准：对准精度有所提高，但是仅限于惯导系统对准时处于水平或接近水平的状态，若惯导系统存在一定的俯仰角或横滚角，两位置对准方法的对准精度会有所下降。



6.2 惯性导航系统的标定—概念和方法

1. 所谓标定就是通过比较陀螺、加速度计的输出值与已知的输入运动或基准信息进行比较确定误差系数，使输出在其取值范围内符合使用要求的过程。系统参数的标定是进行误差补偿的关键，标定的精度直接影响误差补偿的效果。
2. 按照标定的层次，标定方法可以分为元件标定和系统标定。元件的标定一般是在工厂进行的，其目的主要是分析元件的性能和精度估计，目前元件的标定技术已相当成熟。由于惯性仪表的精度最终是要反映在惯性系统的精度水平上，而惯性系统的误差还与系统的结构参数有关，因此需要通过系统的标定对整个惯性系统进行测试，以得到仪表的实际使用性能参数和系统的结构参数。



6.2 惯性导航系统的标定-方法

1. 根据标定的场所可以将标定分为内场标定和外场标定。内场标定是指在实验室内利用惯性测试设备标定测量装置或系统的参数，此时标定出的参数是IMU的诸参数。外场标定则是将系统安装在载体上后进行的标定。
2. 根据观测量的不同系统标定又可以分为分立标定法和系统级标定法。分立标定法直接利用陀螺仪和加速度计的输出作为观测量。系统级标定则利用陀螺仪和加速度计的输出生成导航解算，以导航误差（位置误差、速度误差及姿态误差）作为观测量来确定系统的误差参数。



6.2 惯性导航系统的标定—方法

1. 标定是通过比较陀螺、加速度计的输出值与已知的输入运动或基准信息进行比较确定误差系数，使输出在其取值范围内符合使用要求的过程。系统参数的标定是进行误差补偿的关键，标定的精度直接影响误差补偿的效果。

2. 标定方法——分立标定法、系统标定法

分立标定法： 直接利用惯性仪表的输出作为量测量，与已知的基准信息进行比较从而确定误差参数；

优点： 原理简单，技术成熟。

缺点： 反复拆装，费时费力；标定环境要求高，快速性和机动性差。

系统级标定法： 利用惯性仪表的输出进行导航解算，建立导航误差与惯性仪表误差参数之间的关系，以导航误差作为量测量来辨识误差参数。

优点： 可现场标定；可自标定；无需高精度转台等设备。

4/4/2018 **缺点：** 需要合理设计位置编排方案，部分参数不完全可观测。



6.2 惯性导航系统的标定—方法

1. 在标定时可采用标定点的当地地理坐标系（东北天坐标系）作为基准坐标系，这时比力的基准信息为重力加速度 g ，分解到东北天坐标系中，则在天向为重力加速度 $-g$ ，在东向和北向为0。角速率的基准信息为地球自转角速度 ω_{ie} ，东向的地球自转角速度分量为0，北向为 $\omega_{ie}\cos L$ ，天向为 $\omega_{ie}\sin L$ 。只要准确地测得标定点的重力加速度 g 和纬度 L ，就可以准确地确定陀螺、加速度计的基准信息。



6.2 惯性导航系统的标定—方法

2. 用地球自转角速度标定时有两个明显的缺点：（1）地球自转角速度大小仅为 $15.041^{\circ}/h$ ；（2）在高纬度地区地球自转角速度的水平分量很小。因此，通常将陀螺仪放置在高精度速率转台上，将陀螺仪的输出信号与精确已知的旋转角速率比较，进行动态测试和标定。采用精密分度头使加速度计的输入轴相对于重力矢量进行旋转，精确地改变作用在加速度计输入轴的重力分量，实现加速度计的多位置测试和标定。
3. IMU常用标定方法：速率标定和位置标定
陀螺仪的速率标定、陀螺仪的位置标定
加速度计的位置标定。

加速度测量通道的测量模型：

$$\begin{cases} N_{Ax} = K_{1x}(K_{0x} + f_x + K_{yx}f_y + K_{zx}f_z) \\ N_{Ay} = K_{1y}(K_{0y} + K_{xy}f_x + f_y + K_{zy}f_z) \\ N_{Az} = K_{1z}(K_{0z} + K_{xz}f_x + K_{yz}f_y + f_z) \end{cases}$$

式中， N_{Ax} 、 N_{Ay} 、 N_{Az} 分别为 3 个加速度计采样时间内输出的脉冲数；

f_x 、 f_y 、 f_z 分别为 3 个轴向的视加速度；

K_{0x} 、 K_{0y} 、 K_{0z} 分别为 3 个加速度计的偏值；

K_{1x} 、 K_{1y} 、 K_{1z} 分别为 3 个加速度计输出的标度因数；

K_{yx} 、 K_{zx} ， K_{xy} 、 K_{zy} 和 K_{xz} 、 K_{yz} 为加速度计的安装误差系数。

角速度通道的测量模型：

$$\begin{cases} N_x = E_{1x}(B_{0x} + B_{1x}f_x + B_{2x}f_y + B_{3x}f_z + \omega_x + E_{yx}\omega_y + E_{zx}\omega_z) \\ N_y = E_{1y}(B_{0y} + B_{1y}f_x + B_{2y}f_y + B_{3y}f_z + E_{xy}\omega_x + \omega_y + E_{zy}\omega_z) \\ N_z = E_{1z}(B_{0z} + B_{1z}f_x + B_{2z}f_y + B_{3z}f_z + E_{xz}\omega_x + E_{yz}\omega_y + \omega_z) \end{cases}$$

式中， N_x 、 N_y 、 N_z 分别为陀螺 3 个通道采样时间内输出的脉冲数；

ω_x 、 ω_y 、 ω_z 分别为 3 个轴向的角速度；

B_{0x} 、 B_{0y} 、 B_{0z} 分别为陀螺 3 通道常值漂移项；

B_{1x} 、 B_{1y} 、 B_{1z} ， B_{2x} 、 B_{2y} 、 B_{2z} ， B_{3x} 、 B_{3y} 、 B_{3z} 为陀螺 3 个轴向视加速度的影响系数；

E_{1x} 、 E_{1y} 、 E_{1z} 分别为陀螺 3 个通道输出的标度因数；

E_{yx} 、 E_{zx} ， E_{xy} 、 E_{zy} ， E_{xz} 、 E_{yz} 为陀螺的安装误差系数。



6.2 惯性导航系统的标定方法

1. 陀螺误差参数的标定采用多位置标定方法和速率标定法。多位置标定可以分离陀螺仪的常值漂移系数 B_{0x} 、 B_{0y} 、 B_{0z} ，与加速度有关的漂移系数 B_{1x} 、 B_{1y} 、 B_{1z} 、 B_{2x} 、 B_{2y} 、 B_{2z} 、 B_{3x} 、 B_{3y} 、 B_{3z} 共12个误差系数。速率标定方法可以分离陀螺的标度因数 E_{1x} 、 E_{1y} 、 E_{1z} 和安装误差系数 E_{yx} 、 E_{zx} 、 E_{yz} 、 E_{xz} 、 E_{xy} 、 E_{zy} 共9个误差系数。
2. 加速度计误差参数的标定采用在重力场静态条件下的多位置标定方法。可以分离加速度计零偏 K_{0x} 、 K_{0y} 、 K_{0z} ，标度因素 K_{1x} 、 K_{1y} 、 K_{1z} ，安装误差系数 K_{yx} 、 K_{zx} 、 K_{xy} 、 K_{xy} 、 K_{xz} 、 K_{yz} 。

6.2 惯性导航系统的标定方法-速率标定

为了标定出惯性系统中陀螺的标度因数和安装误差系数，需要给惯性敏感器输入一定的角速率，并测量出陀螺相应轴输出的脉冲数。角速率可以通过速率转台产生。标定时转台以给定的角速率分别正转及反转，利用陀螺在正转及反转过程中的输出数据，即可分离出陀螺的标度因数及安装误差系数。为了提高标定的精度，一般使转台旋转 360° ，采集惯性敏感器在此过程中的脉冲数，这时地球自转角速率在转台水平方向的分量在台体旋转一周时被平均掉。标定时可以根据惯性系统的使用环境来选择转台的速率测试点。也可以选择多个速率测试点进行测试。

速率标定的过程以及分离陀螺的安装误差系数和标度因数的过程和计算公式如下：

(1) 绕轴 ω_x 旋转（正反各转一圈）

$$E_{1x} = \frac{N_{Tx}^+ - N_{Tx}^-}{2 \times 1296000} \quad (2-175)$$

$$E_{yx} = \frac{N_{Ty}^+ - N_{Ty}^-}{2 \times 1296000} \quad (2-176)$$

$$E_{zx} = \frac{N_{Tz}^+ - N_{Tz}^-}{2 \times 1296000} \quad (2-177)$$

6.2 惯性导航系统的标定方法-速率标定

(2) 绕 ω_y 轴旋转（正反各转一圈）

$$E_{1y} = \frac{N_{Ty}^+ - N_{Ty}^-}{2 \times 1296000} \quad (2-178)$$

$$E_{xy} = \frac{N_{Tx}^+ - N_{Tx}^-}{2 \times 1296000} \quad (2-179)$$

$$E_{zy} = \frac{N_{Tz}^+ - N_{Tz}^-}{2 \times 1296000} \quad (2-180)$$

(3) 绕 ω_z 轴旋转（正反各转一圈）

$$E_{1z} = \frac{N_{Tz}^+ - N_{Tz}^-}{2 \times 1296000} \quad (2-181)$$

$$E_{yz} = \frac{N_{Ty}^+ - N_{Ty}^-}{2 \times 1296000} \quad (2-182)$$

$$E_{xz} = \frac{N_{Tx}^+ - N_{Tx}^-}{2 \times 1296000} \quad (2-183)$$

其中， N_{Tx}^+ 、 N_{Ty}^+ 、 N_{Tz}^+ 为 x、y、z 轴正转一周输出的总脉冲数； N_{Tx}^- 、 N_{Ty}^- 、 N_{Tz}^- 为 x、y、z 轴反转一周输出的总脉冲数；1296000 为旋转一周的总角秒(")数。

6.2 惯性导航系统的标定方法-陀螺仪的位置标定

利用多位置试验可以分离出惯性系统中陀螺 X、Y、Z 轴的常值漂移和视加速度影响系数。位置标定可以在双轴速率转台或标准平板上进行。根据标定的精度要求及试验条件可以选择不同的位置数。

由于陀螺的标度因数和安装误差系数已通过速率标定得到，因此在进行 n 个位置标定的情况下，根据 2.2.3 节惯性系统角速度通道的误差模型，可以得到如下用于角速度通道误差系数标定的方程

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} N_{x1}/E_{1x} & N_{y1}/E_{1y} & N_{z1}/E_{1z} \\ N_{x2}/E_{1x} & N_{y2}/E_{1y} & N_{z2}/E_{1z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{xn}/E_{1x} & N_{yn}/E_{1y} & N_{zn}/E_{1z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_{x1} & \omega_{y1} & \omega_{z1} \\ \omega_{x2} & \omega_{y2} & \omega_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_{xn} & \omega_{yn} & \omega_{zn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & E_{xy} & E_{xz} \\ E_{yx} & 1 & E_{yz} \\ E_{zx} & E_{zy} & 1 \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} 1 & f_{x1} & f_{y1} & f_{z1} \\ 1 & f_{x2} & f_{y2} & f_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & f_{xn} & f_{yn} & f_{zn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{0x} & B_{0y} & B_{0z} \\ B_{1x} & B_{1y} & B_{1z} \\ B_{2x} & B_{2y} & B_{2z} \\ B_{3x} & B_{3y} & B_{3z} \end{bmatrix} \quad (2-184)
 \end{aligned}$$

6.2 惯性导航系统的标定方法-陀螺仪的位置标定

式中

$N_{x1}, N_{x2}, \dots, N_{xn}$ 分别为 X 轴向陀螺通道在每个位置单位时间内输出的脉冲数;

$N_{y1}, N_{y2}, \dots, N_{yn}$ 分别为 Y 轴向陀螺通道在每个位置单位时间内输出的脉冲数;

$N_{z1}, N_{z2}, \dots, N_{zn}$ 分别为 Z 轴向陀螺通道在每个位置单位时间内输出的脉冲数;

$f_{x1}, f_{x2}, \dots, f_{xn}$ 分别为重力加速度在每个位置 X 轴向的分量;

$f_{y1}, f_{y2}, \dots, f_{yn}$ 分别为重力加速度在每个位置 Y 轴向的分量;

$f_{z1}, f_{z2}, \dots, f_{zn}$ 分别为重力加速度在每个位置 Z 轴向的分量;

$\omega_{x1}, \omega_{x2}, \dots, \omega_{xn}$ 分别为地球自转角速度在每个位置 X 轴向的分量;

$\omega_{y1}, \omega_{y2}, \dots, \omega_{yn}$ 分别为地球自转角速度在每个位置 Y 轴向的分量;

$\omega_{z1}, \omega_{z2}, \dots, \omega_{zn}$ 分别为地球自转角速度在每个位置 Z 轴向的分量。

6.2 惯性导航系统的标定方法-陀螺仪的位置标定

将方程(2-184)写为矩阵形式，有

$$Y = XB \quad (2-185)$$

其中

$$Y = N - WE, \quad N = \begin{bmatrix} N_{x1}/E_{1x} & N_{y1}/E_{1y} & N_{z1}/E_{1z} \\ N_{x2}/E_{1x} & N_{y2}/E_{1y} & N_{z2}/E_{1z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{xn}/E_{1x} & N_{yn}/E_{1y} & N_{zn}/E_{1z} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} \omega_{x1} & \omega_{y1} & \omega_{z1} \\ \omega_{x2} & \omega_{y2} & \omega_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_{xn} & \omega_{yn} & \omega_{zn} \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & E_{xy} & E_{xz} \\ E_{yx} & 1 & E_{yz} \\ E_{zx} & E_{zy} & 1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & f_{x1} & f_{y1} & f_{z1} \\ 1 & f_{x2} & f_{y2} & f_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & f_{xn} & f_{yn} & f_{zn} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_{0x} & B_{0y} & B_{0z} \\ B_{1x} & B_{1y} & B_{1z} \\ B_{2x} & B_{2y} & B_{2z} \\ B_{3x} & B_{3y} & B_{3z} \end{bmatrix}$$

如果矩阵 $X^T X$ 满秩，则根据最小二乘法可得陀螺漂移矩阵 B 的最小二乘估计 \hat{B} 为：

$$\hat{B} = [X^T X]^{-1} X^T Y \quad (2-186)$$

这样，采用式(2-186)可计算出 $B_{0x}, B_{0y}, B_{0z}, B_{1x}, B_{1y}, B_{1z}, B_{2x}, B_{2y}, B_{2z},$

4/4 B_{3x}, B_{3y}, B_{3z} 共 12 个误差系数。

6.2 惯性导航系统的标定方法-陀螺仪的位置标定

表 2-12 一种 8 位置标定方案

位置	惯性系统方向			重力加速度在各轴向的分量			地球自转角速度在各轴向的分量		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	S	U	W	0	g	0	$-\omega_{ie} \cos L$	$\omega_{ie} \sin L$	0
2	N	U	E	0	g	0	$\omega_{ie} \cos L$	$\omega_{ie} \sin L$	0
3	U	W	S	g	0	0	$\omega_{ie} \sin L$	0	$-\omega_{ie} \cos L$
4	D	W	N	-g	0	0	$-\omega_{ie} \sin L$	0	$\omega_{ie} \cos L$
5	N	W	U	0	0	g	$\omega_{ie} \cos L$	0	$\omega_{ie} \sin L$
6	S	W	D	0	0	-g	$-\omega_{ie} \cos L$	0	$-\omega_{ie} \sin L$
7	N	D	W	0	-g	0	$\omega_{ie} \cos L$	$-\omega_{ie} \sin L$	0
8	S	D	E	0	-g	0	$-\omega_{ie} \cos L$	$-\omega_{ie} \sin L$	0

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & g & 0 \\ 1 & 0 & g & 0 \\ 1 & g & 0 & 0 \\ 1 & -g & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & g \\ 1 & 0 & 0 & -g \\ 1 & 0 & -g & 0 \\ 1 & 0 & -g & 0 \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} -\omega_{ie} \cos L & \omega_{ie} \sin L & 0 \\ \omega_{ie} \cos L & \omega_{ie} \sin L & 0 \\ \omega_{ie} \sin L & 0 & -\omega_{ie} \cos L \\ -\omega_{ie} \sin L & 0 & \omega_{ie} \cos L \\ \omega_{ie} \cos L & 0 & \omega_{ie} \sin L \\ -\omega_{ie} \cos L & 0 & -\omega_{ie} \sin L \\ \omega_{ie} \cos L & -\omega_{ie} \sin L & 0 \\ -\omega_{ie} \cos L & -\omega_{ie} \sin L & 0 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} N_{x1}/E_{1x} & N_{y1}/E_{1y} & N_{z1}/E_{1z} \\ N_{x2}/E_{1x} & N_{y2}/E_{1y} & N_{z2}/E_{1z} \\ N_{x3}/E_{1x} & N_{y3}/E_{1y} & N_{z3}/E_{1z} \\ N_{x4}/E_{1x} & N_{y4}/E_{1y} & N_{z4}/E_{1z} \\ N_{x5}/E_{1x} & N_{y5}/E_{1y} & N_{z5}/E_{1z} \\ N_{x6}/E_{1x} & N_{y6}/E_{1y} & N_{z6}/E_{1z} \\ N_{x7}/E_{1x} & N_{y7}/E_{1y} & N_{z7}/E_{1z} \\ N_{x8}/E_{1x} & N_{y8}/E_{1y} & N_{z8}/E_{1z} \end{bmatrix}$$

6.2 惯性导航系统的标定方法-加速度计的位置标定

加速度计误差参数的标定采用在重力场静态条件下的多位置标定方法。假定选择了 n 个位置进行标定, 根据 2.2.3 节的加速度通道测量模型, 可以得到下式

$$\begin{bmatrix} N_{Ax1}/K_{1x} & N_{Ay1}/K_{1y} & N_{Az1}/K_{1z} \\ N_{Ax2}/K_{1x} & N_{Ay2}/K_{1y} & N_{Az2}/K_{1z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{Axn}/K_{1x} & N_{Ayn}/K_{1y} & N_{Azn}/K_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_{x1} & f_{y1} & f_{z1} \\ 1 & f_{x2} & f_{y2} & f_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & f_{xn} & f_{yn} & f_{zn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{0x} & K_{0y} & K_{0z} \\ 1 & K_{xy} & k_{xz} \\ K_{yx} & 1 & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & 1 \end{bmatrix} \quad (2-187)$$

式中

$N_{Ax1}, N_{Ax2}, \dots, N_{Axn}$ 分别为 X 轴向加速度计在各个位置单位时间内输出的脉冲数;

$N_{Ay1}, N_{Ay2}, \dots, N_{Ayn}$ 分别为 Y 轴向加速度计在各个位置单位时间内输出的脉冲数;

$N_{Az1}, N_{Az2}, \dots, N_{Azn}$ 分别为 Z 轴向加速度计在各个位置单位时间内输出的脉冲数;

6.2 惯性导航系统的标定方法-加速度计的位置标定

将(2-187)式写成矩阵形式，有

$$Z = HX \quad (2-188)$$

式中

$$Z = \begin{bmatrix} N_{Ax1}/K_{1x} & N_{Ay1}/K_{1y} & N_{Az1}/K_{1z} \\ N_{Ax2}/K_{1x} & N_{Ay2}/K_{1y} & N_{Az2}/K_{1z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{Axn}/K_{1x} & N_{Ayn}/K_{1y} & N_{Azn}/K_{1z} \end{bmatrix}, \text{表示量测量, 它是由每个标定位置三个加}$$

速度计的输出组成的。

$$H = \begin{bmatrix} 1 & f_{x1} & f_{y1} & f_{z1} \\ 1 & f_{x2} & f_{y2} & f_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & f_{xn} & f_{yn} & f_{zn} \end{bmatrix}, \text{表示量测矩阵, 它是每个位置的基准信息。}$$

$$X = \begin{bmatrix} K_{0x} & K_{0y} & K_{0z} \\ 1 & K_{xy} & k_{xz} \\ K_{yx} & 1 & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & 1 \end{bmatrix}, \text{表示状态变量矩阵, 它是由加速度计的所有误差参数组成}$$

的, 也就是需要标定的加速度计误差参数。

6.2 惯性导航系统的标定方法-加速度计的位置标定

采用最小二乘法可得加速度计误差参数矩阵的解为：

$$X = (H^T H)^{-1} H^T Z \quad (2-189)$$

这样，就可以得到加速度测量通道的 $K_{0x}, K_{0y}, K_{0z}, K_{1x}, K_{1y}, K_{1z}, K_{yx}, K_{zx}, K_{xy}, K_{zy}, K_{xz}, K_{yz}$ 共 12 个误差系数的估计值。

值得指出的是，惯性系统的位置标定方法有许多排列，常用的有 8 位置、12 位置、16 位置、20 位置及 24 位置等。如何选择标定位置是相当复杂的。总的来说，所选择的标定位置是为了使敏感器的所有误差参数得到充分激励，并且使最小二乘解中的伪逆矩阵存在。角速度通道和加速度通道可以根据具体情况选择不同的方位进行误差系数的分离和标定，应用时可以根据具体情况进行方位编排。例如，从加速度计误差参数标定公式(2-189)式可以看出，需要标定的误差参数一共有 12 个，只需要四个位置就可以分离出全部误差参数。为了使误差参数充分得到激励，保证标定精度，可以选择更多的位置进行标定。

经过位置标定和速率标定，分离和标定出了惯性系统的误差模型中的全部误差系数。



6.3 惯性导航系统的误差补偿

误差补偿的基本思想是修正可预测的一种或多种系统误差对敏感器精度的影响。基本要求是误差可以量测，因此，它们对系统性能的影响也是可以预测的。这要求误差过程可以用方程来表示并进而加以数学建模，并且可以得到对应于干扰作用(如温度或加速度)的信号，而且可以按照需要的精度进行测量。因此，误差补偿是通过测量适当的误差系数，并利用这些值对测量值加以修正，以除去惯性敏感器或系统中可预测的误差项。除了敏感器误差补偿外，通常对各种系统误差也要进行补偿，如敏感器安装误差等。误差补偿通常在系统软件中实现。



6.3 惯性导航系统的误差补偿

惯性测量组合的误差补偿：通过位置标定及速率标定，标定分离出系统的误差系数。它们是陀螺仪的常值漂移系数 B_{0x} 、 B_{0y} 、 B_{0z} ，与加速度有关的漂移系数 B_{1x} 、 B_{1y} 、 B_{1z} 、 B_{2x} 、 B_{2y} 、 B_{2z} 、 B_{3x} 、 B_{3y} 、 B_{3z} 共12个误差系数，标度因数 E_{1x} 、 E_{1y} 、 E_{1z} 和安装误差系数 E_{yx} 、 E_{zx} 、 E_{yz} 、 E_{xz} 、 E_{xy} 、 E_{zy} ，加速度计零偏 K_{0x} 、 K_{0y} 、 K_{0z} ，标度因素 K_{1x} 、 K_{1y} 、 K_{1z} ，安装误差系数 K_{yx} 、 K_{zx} 、 K_{xy} 、 K_{xy} 、 K_{xz} 、 K_{yz} 。将这些标定出的误差系数装订入计算机中，按误差测量模型方程，对系统的角速度及加速度进行补偿，解算出 f_x 、 f_y 、 f_z 及理想角速度。

加速度测量通道的测量模型：

$$\begin{cases} N_{Ax} = K_{1x}(K_{0x} + f_x + K_{yx}f_y + K_{zx}f_z) \\ N_{Ay} = K_{1y}(K_{0y} + K_{xy}f_x + f_y + K_{zy}f_z) \\ N_{Az} = K_{1z}(K_{0z} + K_{xz}f_x + K_{yz}f_y + f_z) \end{cases}$$

式中， N_{Ax} 、 N_{Ay} 、 N_{Az} 分别为 3 个加速度计采样时间内输出的脉冲数；

f_x 、 f_y 、 f_z 分别为 3 个轴向的视加速度；

K_{0x} 、 K_{0y} 、 K_{0z} 分别为 3 个加速度计的偏值；

K_{1x} 、 K_{1y} 、 K_{1z} 分别为 3 个加速度计输出的标度因数；

K_{yx} 、 K_{zx} ， K_{xy} 、 K_{zy} 和 K_{xz} 、 K_{yz} 为加速度计的安装误差系数。

角速度通道的测量模型：

$$\begin{cases} N_x = E_{1x}(B_{0x} + B_{1x}f_x + B_{2x}f_y + B_{3x}f_z + \omega_x + E_{yx}\omega_y + E_{zx}\omega_z) \\ N_y = E_{1y}(B_{0y} + B_{1y}f_x + B_{2y}f_y + B_{3y}f_z + E_{xy}\omega_x + \omega_y + E_{zy}\omega_z) \\ N_z = E_{1z}(B_{0z} + B_{1z}f_x + B_{2z}f_y + B_{3z}f_z + E_{xz}\omega_x + E_{yz}\omega_y + \omega_z) \end{cases}$$

式中， N_x 、 N_y 、 N_z 分别为陀螺 3 个通道采样时间内输出的脉冲数；

ω_x 、 ω_y 、 ω_z 分别为 3 个轴向的角速度；

B_{0x} 、 B_{0y} 、 B_{0z} 分别为陀螺 3 通道常值漂移项；

B_{1x} 、 B_{1y} 、 B_{1z} ， B_{2x} 、 B_{2y} 、 B_{2z} ， B_{3x} 、 B_{3y} 、 B_{3z} 为陀螺 3 个轴向视加速度的影响系数；

E_{1x} 、 E_{1y} 、 E_{1z} 分别为陀螺 3 个通道输出的标度因数；

E_{yx} 、 E_{zx} ， E_{xy} 、 E_{zy} ， E_{xz} 、 E_{yz} 为陀螺的安装误差系数。

6.3 惯性导航系统的误差补偿

设 τ 为采样周期, $\Delta N_{Ax}, \Delta N_{Ay}, \Delta N_{Az}$ 为三个加速度计在采样时间 τ 内输出的脉冲数; $\Delta N_x, \Delta N_y, \Delta N_z$ 为三个陀螺在采样时间 τ 内输出的脉冲数; $\Delta W_{x0}, \Delta W_{y0}, \Delta W_{z0}$ 为惯性系统输出的在采样时间 τ 内载体三个方向的视速度增量; $\Delta \theta_{x0}, \Delta \theta_{y0}, \Delta \theta_{z0}$ 为惯性系统输出的在采样时间 τ 内载体绕三个轴的角度增量。由式 (2-27)、式 (2-28) 中变量的定义, 有 $\Delta N_x = \tau N_x, \Delta N_y = \tau N_y, \Delta N_z = \tau N_z$ 和 $\Delta W_x = \tau N_x, \Delta W_y = \tau N_y, \Delta W_z = \tau N_z$ 。根据式 (2-27) 和式 (2-28), 可以得到加速度和角速度误差补偿的公式为 (2-190) 和 (2-191)。使用标定分离出的惯性系统误差系数, 按照式 (2-190) 和 (2-191) 解算出 f_x, f_y, f_z 和 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, 即实现了惯性系统的误差补偿。

6.3 惯性导航系统的误差补偿-加速度计

加速度测量通道的测量模型:

$$\begin{cases} N_{Ax} = K_{1x}(K_{0x} + f_x + K_{yx}f_y + K_{zx}f_z) \\ N_{Ay} = K_{1y}(K_{0y} + K_{xy}f_x + f_y + K_{zy}f_z) \\ N_{Az} = K_{1z}(K_{0z} + K_{xz}f_x + K_{yz}f_y + f_z) \end{cases}$$

式中, N_{Ax} 、 N_{Ay} 、 N_{Az} 分别为 3 个加速度计采样时间内输出的脉冲数;

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} 1 & K_{yx} & K_{zx} \\ K_{xy} & 1 & K_{zy} \\ K_{xz} & K_{yz} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta W_{x0} - K_{0x}\tau \\ \Delta W_{y0} - K_{0y}\tau \\ \Delta W_{z0} - K_{0z}\tau \end{bmatrix} \quad (2-190)$$

式中

$$\begin{bmatrix} \Delta W_{x0} \\ \Delta W_{y0} \\ \Delta W_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta N_{Ax} / K_{1x} \\ \Delta N_{Ay} / K_{1y} \\ \Delta N_{Az} / K_{1z} \end{bmatrix} \quad (2-192)$$

6.3 惯性导航系统的误差补偿-陀螺仪

角速度通道的测量模型：

$$\begin{cases} N_x = E_{1x}(B_{0x} + B_{1x}f_x + B_{2x}f_y + B_{3x}f_z + \omega_x + E_{yx}\omega_y + E_{zx}\omega_z) \\ N_y = E_{1y}(B_{0y} + B_{1y}f_x + B_{2y}f_y + B_{3y}f_z + E_{xy}\omega_x + \omega_y + E_{zy}\omega_z) \\ N_z = E_{1z}(B_{0z} + B_{1z}f_x + B_{2z}f_y + B_{3z}f_z + E_{xz}\omega_x + E_{yz}\omega_y + \omega_z) \end{cases}$$

式中， N_x 、 N_y 、 N_z 分别为陀螺 3 个通道采样时间内输出的脉冲数；

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} 1 & E_{yx} & E_{zx} \\ E_{xy} & 1 & E_{zy} \\ E_{xz} & E_{yz} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\theta_{x0} - B_{0x}\tau_c - B_{1x}f_x - B_{2x}f_y - B_{3x}f_z \\ \Delta\theta_{y0} - B_{0y}\tau_c - B_{1y}f_x - B_{2y}f_y - B_{3y}f_z \\ \Delta\theta_{z0} - B_{0z}\tau_c - B_{1z}f_x - B_{2z}f_y - B_{3z}f_z \end{bmatrix} \quad (2-191)$$

式中

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_{x0} \\ \Delta\theta_{y0} \\ \Delta\theta_{z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta N_x / E_{1x} \\ \Delta N_y / E_{1y} \\ \Delta N_z / E_{1z} \end{bmatrix} \quad (2-193)$$



6.3 惯性导航系统的误差补偿

1. 值得指出的是，测量的系数随时间、温度、振动、施加的运动以及逐次工作而变化，而正是这些变化最终决定了系统的性能。当不可能对大多数的这些误差加以补偿时，温度补偿常常是获得给定的性能目标的主要因素。
2. 应用补偿方法所能得到的精度取决于“误差”方程中的系数代表实际敏感器误差的精确程度。这个表达式通常作为时间、敏感器的使用环境及使用频度的函数而变化。对于更为苛刻的应用，需要定期对敏感器进行重新标定，以保证补偿程序对特定应用需求的有效性。

思考题

1. 何为标定？标定与误差补偿的关系。
2. 简述陀螺仪和加速度计测量模型中误差系数的标定过程。



惯性导航的特点及惯导技术发展

1. 惯性导航具有高自主性、抗干扰性、高的短期精度、高数据输出率、完备的导航信息、适应范围广等特点。
2. 惯性导航的系统误差具有周期振荡的特性，某些导航参数误差具有随时间积累的特性。惯导系统精度主要由惯性器件精度决定，其中以陀螺仪的精度尤为突出。
3. 由于重力加速度随高度增加而减小，纯惯导系统高度通道工作不稳定，必须引入外部高度信息进行阻尼。
4. 惯性导航是一种航位推算导航，正常工作前需要初始化信息。初始化主要任务包括：给定初始速度和位置；惯导平台对准；惯性器件测漂和标定。准备时间长。



惯性导航系统的主要研究方向

- 研制和采用新型、高精度惯性器件
- 惯性器件误差建模与器件误差补偿技术
- 高精度惯性导航和姿态计算算法研究
- 快速、高精度对准技术
- 与其他传感器或导航系统进行组合
- 估计理论在惯性导航中的应用
- 惯性导航技术应用



谢谢各位!



[返回目录](#)



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY