

惯导系统自标定技术

汪立新 徐军辉 刘洁瑜 熊 陶 著

西北工业大学出版社

惯导系统自标定技术

汪立新 徐军辉 刘洁瑜 熊 陶 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书全面研究了惯导系统自标定技术,利用惯导系统的一次通电特性,可有效地提高惯导系统的使用性能。在分析惯导系统误差模型及其传统标定方法的基础上,主要探讨了平台式惯导系统射前自标定技术、平台式惯导系统航向效应自标定技术、捷联式惯导系统自标定技术以及捷联式惯导系统加速度计自标定技术。

本书可作为导航、制导与控制及相关专业研究生及研究所、部队工程技术人员教科书和技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

惯导系统自标定技术/汪立新等著. —西安:西北工业大学出版社,2010. 6

ISBN 978-7-5612-2814-2

I. ①惯… II. ①汪… III. ①惯性导航—目标—系统分析
IV. ①TN966

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 115945 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西丰原印务有限公司

开 本:850 mm×1 168 mm 1/32

印 张:6.5 插页 2

字 数:158 千字

版 次:2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

定 价:58.00 元

前 言

惯导系统具有军民两用属性。它作为定位、制导装置,广泛应用于陆、海、空、天四领域中的飞机、航天飞行器、导弹、舰船、鱼雷、潜艇的导航与控制;作为控制和稳定装置,广泛应用于坦克、火炮发射平台、雷达天线、潜望镜、瞄准镜、动态航空摄影的稳定、机器人的导航与控制;作为测量与定位装置,广泛应用于地球物理场的测量、土地利用测量、建筑布局测量、河流和洪泛区测量、重力梯度测量、地震监测等。惯导系统性能的优劣,直接影响火箭、导弹、舰船、飞机等使用惯导系统的载体的性能。为提高其使用性能,就必须加强惯导系统的测试技术研究,建立其误差模型,准确评价其性能,通过误差补偿措施来提高其实际使用时的精度。传统标定方法一般在地面上进行,需要依靠地面设备和复杂的地面操作,这将使惯导系统使用的机动性、快速性受到一定限制;同时,传统的标定方法利用的是惯导系统的逐次通电特性,从而降低了其使用精度。

本书全面、系统地介绍了惯导系统的自标定技术及其相关理论,是作者在多年教学、科研工作的基础上,结合有关教学和科研成果整理、撰写而成的。

全书共分6章:第1章主要介绍了惯导系统自标定技术的研究现状。第2章主要介绍惯导系统传统标定测试的原理和方法,为自标定技术研究提供了理论基础。第3章主要介绍了平台式惯导系统的自标定技术。第4章主要介绍了平台式惯导系统航向效应的自标定技术。第5章主要介绍了捷联式惯导系统自标定技术。第6章主要介绍了捷联式惯导系统加速度计自标定技术。其

中主要内容都是首次公开发表。书中所述惯导自标定技术研究成果已获得多项国防发明专利。

本书主要由汪立新统筹策划,由汪立新、徐军辉、刘洁瑜、熊陶完成主要内容的撰写,第二炮兵工程学院讲师周小刚博士参与了部分内容的撰写。

这里要特别感谢第二炮兵工程学院钱培贤教授。本书作者均是钱教授的学生,书中的主要内容多数都是在钱教授的指导下编写、完成的。钱教授对全书进行了认真细致的审阅和修改。在此对导师的教育、培养之恩表示诚挚的谢意。

由于水平有限,书中存在的不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2010 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 惯导系统概述	1
1.2 惯导系统传统标定测试方法概述	11
1.3 惯导系统自标定技术概述	13
1.4 惯导系统自标定中常用坐标系	14
1.5 地球参考椭球及地球重力场特性	26
第 2 章 惯导系统误差模型及其传统标定方法	37
2.1 引言	37
2.2 惯导系统的误差模型	38
2.3 惯导系统的传统标定方法	41
第 3 章 平台式惯导系统射前自标定技术	52
3.1 引言	52
3.2 平台式惯导系统自标定误差模型	52
3.3 平台式惯导系统方位自对准技术	53
3.4 平台式惯导系统射前自标定技术	58
第 4 章 平台式惯导系统航向效应自标定技术	78
4.1 引言	78
4.2 平台式惯导系统航向效应漂移误差模型	80
4.3 平台式惯导系统航向效应转台标定技术	84

4.4 平台式惯导系统航向效应自标定技术·····	88
第5章 捷联式惯导系统自标定技术·····	110
5.1 引言·····	110
5.2 捷联式惯导系统自标定基础知识·····	115
5.3 捷联式惯导系统自标定技术·····	123
5.4 捷联式惯导系统自标定中的数据处理技术·····	137
5.5 捷联式惯导系统自标定实验分析·····	155
第6章 捷联式惯导系统加速度计自标定技术·····	156
6.1 引言·····	156
6.2 自标定加速度计组合设计思想·····	157
6.3 自标定加速度计组合的射前自标定技术·····	158
6.4 基于系统辨识的任意初始状态加速度计自标定 技术·····	165
6.5 自标定加速度计组合设计·····	170
6.6 自标定实验分析·····	176
附录 四元数法·····	183
参考文献·····	192

第 1 章 绪 论

1.1 惯导系统概述

进入 21 世纪,世界政治军事格局和形势发生了深刻的变化。面对 21 世纪信息化战场,导弹武器系统正在向数字化、智能化、小型化和自主化方向发展。导弹武器装备性能的优劣主要反映在精确打击能力、快速反应能力、突防能力和生存能力等方面。从美国参与的几次局部战争可以看出,先发制人、大规模使用精确打击武器,将对方的打击能力扼杀在能够实施打击之前将是今后主要的作战模式。因此,如何提高导弹武器的射前生存能力,确保其在敌人的精确打击下能够生存下来,并能够快速发射出去,将是今后我国导弹武器的重点研究内容之一。

惯性制导系统,简称惯导系统,是导弹武器制导和控制系统中的关键部件,其性能的优劣直接影响导弹命中精度,惯性器件所引起的误差通常占整个制导误差的 70% 以上。因此,惯导系统基本上决定了导弹是否能“打准”的问题,提高惯导系统的使用精度对于提高整个导弹武器的命中精度有着非常重要的意义。

惯导系统的功能主要包括在飞行过程中为导弹建立基准坐标系,测量导弹的角速度,测量导弹的加速度,为导弹发射前进行初始对准提供方向基准,确定发射点的地理位置和坐标方向等。目前,惯导系统的主要实现方案有两种:平台式惯导系统和捷联式惯导系统。

1.1.1 平台式惯导系统概述

平台式惯导系统(又称为平台式惯导系统,简称平台)的核心部分是一个实际的陀螺稳定平台。它是以陀螺仪作为敏感元件,利用陀螺仪特性直接或间接地使某一物体相对于地球或惯性空间保持给定位置,或按给定规律改变起始位置的一种装置。它为加速度计提供了精确的测量基准。平台完全隔离了导弹的角运动,保证了加速度计的良好工作环境。其主要功能:

(1)建立一个与载体角运动无关的导航坐标系(惯性坐标系或地理坐标系),为平台台体上的加速度计提供测量基准,给出导航参数(位置、速度)。

(2)提供载体姿态角测量的坐标基准。

(3)在载体上用来稳定其他设备。

根据建立的导航坐标系的不同,平台式惯导系统可分为两种。一种是空间稳定平台惯性导航系统,用以建立惯性坐标系作为导航坐标系,地球自转、重力加速度等影响由计算机加以补偿,这种系统多用于弹道式导弹、运载火箭和一些航天器上。另一种是当地水平惯性导航系统,它包括指北方位惯性导航系统、自由方位惯性导航系统、游动方位惯性导航系统以及自由方位旋转惯性导航系统等,它们都有一个水平平台,只是方位指向不同,主要用于水平导航,其导航坐标是地理坐标系。由于台体上的2个加速度计输入轴所构成的基准平面能始终跟踪载体所在点的当地水平面,因而其加速度计不受重力加速度的影响,多用于飞机、巡航导弹等。

根据平台稳定的方式不同,平台式惯导系统又可分为3类:解析式惯导系统、半解析式惯导系统和几何式惯导系统。它们的特点见表1.1。

表 1.1 3 种典型惯导系统的比较

系统类型	解析式	半解析式	几何式
平台稳定方式	稳定于惯性空间	稳定于地理坐标系或水平面	稳定于惯性空间，或稳定于地理坐标系
应用范围	宇宙航行、弹道式导弹	飞机、巡航式导弹	船舶、潜艇

一、半解析式惯性导航系统

从总体上来讲,各类惯性导航系统都必须解决 2 个问题:一是如何利用惯性导航平台建立一个三维空间坐标系,确定输入信号的测量基准;二是如何通过不同坐标系之间的变换,利用加速度计输出信息的积分得到载体的速度和位置等导航信息。所以,不同坐标系的选择以及它们在载体内部的实现方法(通过平台实现)就构成了惯性导航系统的不同方案。半解析式惯性导航系统是其中最具代表性的一类导航系统。该系统采用的陀螺稳定平台(有时称为惯性平台或简称平台)始终跟踪当地水平面,使平台上放置的 2 个敏感轴相互垂直的加速度计对重力加速度 g 不敏感,这是半解析式惯性导航系统的主要特征。半解析式平台式惯导系统如图 1.1 所示,图中给出了平台和地球表面相对位置示意。当载体从地面 A 点移动到 B 点时,平台始终跟踪当地水平面。依据平台相对地面的方位不同,半解析式惯性导航系统又可分为两种类型。

1. 固定方位半解析式惯性导航系统

这类惯导系统的平台相对地面的方位是固定的,通常使平台上的一个敏感轴固定指向地球的北方向,故称其为固定方位半解析式惯性导航系统。

以后如不特殊指出,所说的半解析式惯性导航系统就是指固定方位半解析式惯性导航系统。这种系统的平台坐标系将模拟地理坐标系,因此在高纬度区实现这种系统有一定难度。

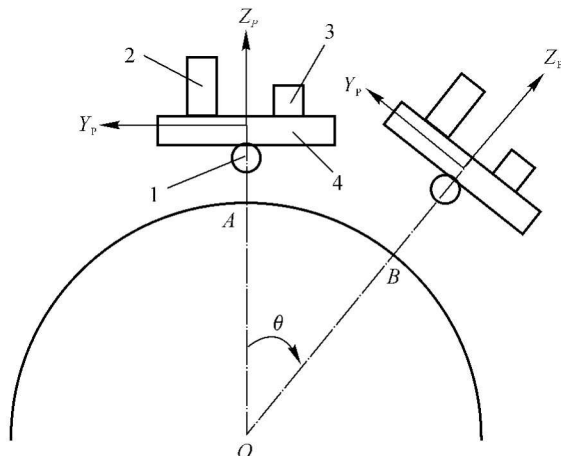


图 1.1 半解析式惯导系统平台

1—平台轴； 2—陀螺； 3—加速度计； 4—平台

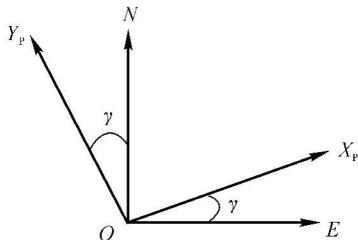
在高纬度区,单位经度角对应地球表面的弧度长度变短,所以,平台为了模拟地理坐标系,要求平台在方位上有较快的变化率,为此要求方位陀螺仪的力矩器接受很大的控制电流,又要求平台以较高的速率绕方位轴转动,这为陀螺平台回路在工程上的实现带来很大的困难。另一个困难是当纬度接近 90° 时,计算机在计算 $\tan\varphi$ 的程序中会出现发散现象。因此,固定方位半解析式惯性导航系统不适合于全球导航应用。

2. 自由方位半解析式惯性导航系统

另一类是平台相对地球的方位是不固定的,自由方位半解析式惯导系统就是其中的一种,这种系统除了平台水平回路保持在当地水平面之外,其平台的方位和真北方向的夹角是不加控制的。平台坐标系的方位轴 Z_P 和当地垂线重合,而平台的水平轴 X_P 和 Y_P 则分别与东方向、北方向相差角 γ ,如图 1.2 所示。当平台相对

于北方向的方位角 γ 作为一个计算量存储于计算机中时,因平台绕垂线是自由的,故角 γ 的变化为

$$\dot{\gamma} = (\dot{\lambda} + \omega_{ie}) \sin \varphi \quad (1.1)$$



1.2 自由方位平台系统方位角

因此,只要知道平台轴 Y_P 的初始对准角, γ 角的大小就可以实时地计算出来。这种系统的优点是在高纬度区和在初始对准时,不像固定方位半解析式惯导系统那样需要给方位陀螺施加很大的力矩,而在计算机中存储变化的 γ 角是易于实现的,故自由方位半解析式惯导系统常用做通过极地的导航系统。

属于自由方位半解析式惯导系统的方案,还有一种称为游动自由方位半解析式惯导系统。它的特点是在方位陀螺上施加一定的控制力矩,使其完成相对惯性空间的旋转,大小为 $\omega_{ie} \sin \varphi$, 所以方位角 γ 的变化为

$$\dot{\gamma} = \dot{\lambda} \sin \varphi \quad (1.2)$$

这种系统具有和自由方位半解析式惯导系统同样可以通过极地的优点。通过分析,发现它在导航参数的计算上有一定的优越性,因此,更具有实用意义。

二、解析式惯性导航系统

解析式惯导系统的陀螺稳定平台组成形式和半解析式惯导系统的陀螺稳定平台相同,只是在工作时,它是相对于惯性空间稳定

的。因此,稳定平台只需 3 个稳定回路就可以了,当然从原理上讲,航向角的坐标变换器还是需要的。在载体运动时,平台相对于地球的相对位置如图 1.3 所示。平台上安装 3 个加速度计,它们的敏感轴组成三维正交坐标系。平台相对于惯性空间没有旋转角速度,加速度计的输出信号中不含哥氏加速度项和向心加速度项,计算公式简单。但是经过制导计算机给出的速度和位置均是相对地心惯性坐标系的。如果要求给出载体相对于地球的速度和地理坐标系的位置,则必须进行适当的坐标变换。由于平台是相对惯性空间稳定的,当载体运动时,平台坐标系相对于重力加速度 g 的方向是在不断变化的,因此出现在 3 个加速度计输出信号中的 g 的分量值是在不断变化的,必须通过计算机对 g 的分量值的计算,从信号中消除相应的 g 分量,然后进行积分才能得到相对于惯性坐标系的速度和位置分量。

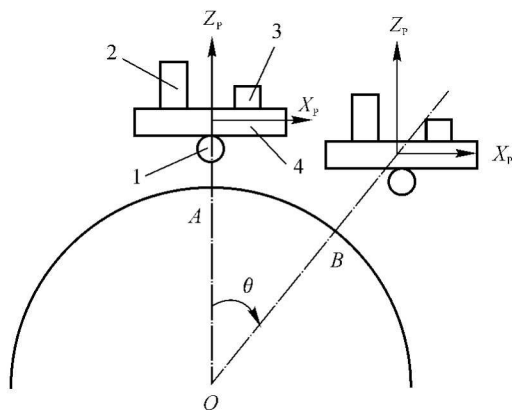


图 1.3 解析式惯导平台

1—平台轴; 2—陀螺; 3—加速度计; 4—平台

1.1.2 捷联式惯导系统概述

捷联式惯导系统(简称捷联惯导)与平台式惯导系统的主要区别是:它没有实体的陀螺稳定平台,加速度表和陀螺仪直接安装在导弹上,通过导航计算机的运算,建立一个“数学平台”。它一般由加速度表、陀螺仪和计算机装置等器件组成。加速度表敏感轴与弹体坐标系轴平行,用以测量视加速度在弹体坐标系各轴上的分量;导弹的姿态,可由双自由度陀螺仪测量,也可用双轴或单轴的速率积分陀螺仪测量姿态角速度增量,经过复杂的计算求得。前者称为位置捷联惯性制导方案,后者则称为速率捷联惯性制导方案。计算装置则根据所测数据进行综合计算,并转换成控制发动机关机指令和横法向导引信号。将陀螺仪绕弹体坐标系的三个角速度,通过计算机实时计算,形成由弹体坐标系向类似实际平台坐标系的“平台”坐标系转换,即解算出姿态矩阵。并利用这个姿态矩阵,进一步求出导弹的姿态和航向信息,使实体平台功能无一缺少。

捷联式惯导系统的主要优点在于体积小、质量轻、允许全姿态工作,而且系统的可靠性也比较高。其缺点主要是控制精度不够高,这是因为其敏感元件固连弹体,直接受恶劣环境影响。所以,研制在恶劣环境条件下能够实现高精度测量的新型敏感元件(如激光陀螺仪等)是发展捷联式惯导系统的关键。

一、位置捷联式惯导系统

捷联式惯导系统不同于平台式惯导系统,捷联式惯导系统的加速度表直接固连于导弹弹体上,因而加速度表的敏感轴方向取决于导弹在空间的姿态。导弹的姿态可通过双自由度陀螺仪测量,也可用单自由度的速率积分陀螺测量导弹姿态角的角速度增量,然后经过运算求得。

与平台式惯导系统利用物理平台模拟实际导航坐标基准不

同,捷联惯导利用数学平台提供导航基准,实际是通过弹体坐标系与导航坐标系之间的转换基准来实现的。

采用双自由度陀螺仪直接测量导弹姿态的捷联惯导称为位置捷联惯导。测量导弹的 3 个姿态需要 2 个双自由度位置陀螺仪。由于每个陀螺仪具有 2 个姿态角测量轴,所以,2 个双自由度位置陀螺可提供 4 个测量轴。根据这 2 个陀螺的安装方式不同,分别被称为水平陀螺仪和垂直陀螺仪。水平陀螺仪的转子轴与导弹射面平行,利用其外环轴可以测量导弹俯仰角;垂直陀螺仪的转子轴垂直于射面,其内环轴测量滚动角、外环轴测量偏航角。捷联式惯导系统在开始导航工作前,也必须进行初始对准,即确定导航计算的初始条件。捷联式惯导系统初始对准的物理实质与平台式惯导系统一样,不同的是捷联式数学平台的水平基准是计算机根据加速度表所感测重力加速度的水平分量,用数学计算方法确定,惯导测量部件也不会像物理平台那样相对水平面转动。在完成水平基准的确定后,根据陀螺仪跟随地球转动所感测的信息,可确定出数学平台所处的方位,从而便可完成捷联式惯导系统的初始对准。与平台式惯导类似,捷联式惯导系统初始对准的水平精度主要取决于加速度表的零偏;而方位精度取决于陀螺漂移的大小。

二、速率捷联式惯导系统

通过积分陀螺测量姿态角速度增量,间接求出姿态角的捷联式惯导系统称为速率捷联式惯导系统。速率捷联式惯导系统的原理示意如图 1.4 所示。

速率捷联式惯导系统一般由速率积分陀螺、加速度表和计算机组成。加速度表的敏感轴相对导弹固定,测量视加速度在导弹 3 个轴上的分量。速率积分陀螺不同于位置陀螺,位置陀螺测量是基于陀螺的定轴性;而速率积分陀螺则是利用了陀螺的进动性。陀螺的敏感轴与导弹固连,随弹一起运动。速率积分陀螺测量导弹瞬时角速度在弹体坐标系 3 个轴上的分量。计算机据此计算导

弹相对导航坐标系的姿态,并把加速度表测量值变换为视加速度在导航坐标系的投影。

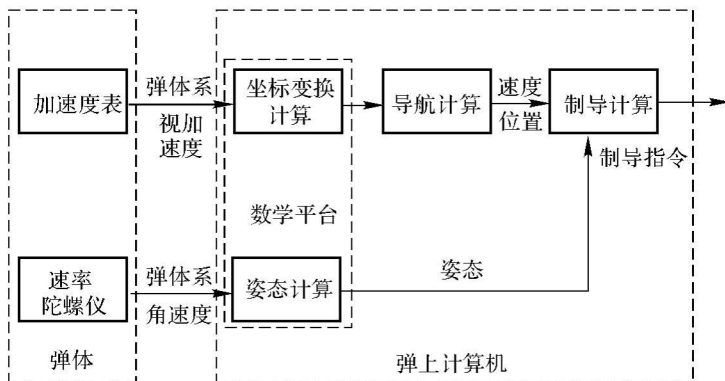


图 1.4 速率捷联式惯导系统原理框图

与一般惯导系统一样,速率捷联式惯导系统主要包括 2 个任务。一是求解关机特征量。利用惯性测量组合输出相对于弹体坐标系的运动参数,经过计算机实时采样并经误差补偿后,通过四元数计算和坐标转换,获得导弹相对于惯性坐标系的速度、位置、姿态导航状态参数,按照给定的关机方程,求解关机特征量,实现射程控制。二是进行导引计算,发出横、法向导引信息。

速率捷联式惯导系统是通过数学平台来实现物理平台的功能。速率捷联式惯导系统的数学平台主要有以下两个主要功能:

- (1) 根据速率积分陀螺测量值决定弹体坐标系到导航坐标系的转换矩阵,提供导航计算所要求的坐标基准。
- (2) 给出姿态控制所要求的导弹相对导航坐标系的姿态。

速率捷联惯导中,姿态矩阵可以采用方向余弦给出或者以四元数(参见附录)的形式给出。由于方向余弦算法涉及反三角函数计算,所以,多选用四元数方法。有关四元数的基本概念可参见本

书附录。

1.1.3 惯导系统的特点

由于平台式惯导系统依靠框架隔离了导弹角运动对惯性测量装置的影响,为惯性仪表提供了良好的工作条件,使其对输出信号的补偿和修正都比较简单,计算量小,但其机械结构复杂,体积较大。而捷联式惯导系统取消了结构复杂的机电式平台,减少了大量机械零件、电子元件、电气电路,不仅减少了体积、质量、功耗和成本,而且大大提高了系统可靠性和可维修性。但是,由于陀螺仪和加速度计直接与弹体相连,弹体运动将直接传递到惯性元件,恶劣的工作环境将引起惯性元件一系列动态误差,所以误差补偿复杂,导航精度一般低于平台式惯导系统。目前,捷联式惯导系统主要用于近程和常规战术导弹武器,而中远程和洲际导弹以及巡航导弹主要还是采用平台式惯导系统。

惯导系统是唯能够对弹道导弹提供多种精确导航参数信息的自主导航设备,它利用惯性敏感元件(陀螺仪和加速度计)测量载体相对惯性空间的线运动和角运动参数,经过不同的机械编排得到载体的姿态参数和导航定位参数。惯导系统利用载体本身信息以及牛顿运动定律进行工作,它具有自己独特的优势。

1. 工作自主性强

它不依靠外界信息,在不与外界发生联系的条件下独立完成导航或制导任务,因此,惯导系统可以使载体扩大活动范围,并且它与外界无任何信息交换,可以避免被敌方发现而受攻击或干扰。这在当前信息化战争条件下尤为重要。

2. 提供导航参数多

惯导系统可以实时提供加速度、速度、位置、姿态和航向等最全面的导航信息。