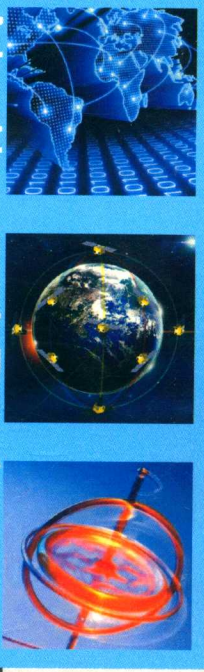
国防特色教材·控制科学与工程

National Defense TEXTBOOK



惯性导航基础

GUANXING DAOHANG JICHU

王新龙 编著

（第2版）

西北工业大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

国防特色教材·控制科学与工程

惯性导航基础

（第2版）

王新龙　编著

理工大学 藏書 图書馆

西北工业大学出版社

西安

【内容简介】 “惯性导航基础”是高等学校导航制导与控制专业的一门重要的专业课程。本书全面系统地阐述惯性导航的基本知识，包括惯性元器件(陀螺仪和加速度计)、平台式惯导系统、捷联式惯导系统以及组合导航系统的理论与方法，并吸取部分近年来国内外研究成果；在内容安排上循序渐进，由浅入深，物理概念清晰，确保知识连贯。为便于读者理解、掌握概念的内涵，书中提供了大量详细的例题与仿真实例。

本书可作为高等工科学校导航、制导与控制专业本科生和研究生的教材，也可供涉及惯性导航方面工作的研究者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

惯性导航基础/王新龙编著. —2 版. —西安：
西北工业大学出版社，2019.8
ISBN 978-7-5612-6528-4

Ⅰ.①惯… Ⅱ.①王… Ⅲ.①惯性导航系统-高等学校-教材 Ⅳ.①TN966

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 175940 号

GUANXING DAOHANG JICHU
惯 性 导 航 基 础

责任编辑：孙 倩	策划编辑：雷 军
责任校对：张 友	装帧设计：李 飞
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)88491757，88493844	
网 址：www.nwpup.com	
印 刷 者：兴平市博闻印务有限公司	
开 本：787 mm×960 mm	1/16
印 张：23	
字 数：530 千字	
版 次：2019 年 8 月第 2 版	2019 年 8 月第 1 次印刷
定 价：68.00 元	

如有印装问题请与出版社联系调换

前　言

惯性导航具有高度的自主性、隐蔽性以及信息的完备性等特点，随着国民经济与国防建设的发展，惯性导航技术的应用日益广泛。目前惯性导航不仅应用于军事、工程和科学研究等领域，例如飞机、舰船、潜艇、航天器与导弹等，而且已扩展到民用领域，例如石油钻井、大地测量、航空测量与摄影、车辆以及移动机器人等系统中。在各类导航系统中，惯性导航系统被认为是最重要的一种导航系统。随着惯性元器件、现代控制理论与计算机技术的发展，惯性导航系统技术的发展也出现了一些新的特点，如捷联式惯性导航系统以其体积小、质量轻、成本低、结构简单和可靠性高等特点，有取代平台式惯性导航系统的趋势，同时新兴惯性元器件的不断涌现以及误差建模与补偿技术等也取得了很大的发展。这些新技术为惯性导航技术的发展注入了新的活力，也推动着惯性导航技术的进一步发展。

本书是一本专业教材。在编写过程中，吸取以前著作及笔者多年来在教学与科研等方面的经验与研究成果。本书得到国家自然科学基金(61673040、61074157、60304006)、航空科学基金(20170151002、2015ZC51038)、天地一体化信息技术国家重点实验开放基金(2015－SGIIT－KFJJ－DH－01)等项目的资助，并参考国内外有关的文献资料，注重反映当代惯性导航技术的发展现状及今后的发展趋向。同时，注重理论和工程应用相结合，特别注重在物理概念上给以明确解释。另外，本书增加了例题部分，通过实例说明概念、原理如何应用，在叙述上力求突出重点、深入浅出和便于自学。全书注意从数学、力学的基本概念出发，由浅入深地进行论述，即使没有学过导航系统知识的读者也可通过自学看懂本书。

全书分为11章。第1章为绪论；第2章为惯性导航的基本知识；第3章为转子陀螺仪基本理论及特性；第4章为新兴陀螺仪与陀螺定向装置的相关知识；第5章为加速度计的有关知识；第6章为平台式惯性导航系统；第7章为惯性导航系统误差分析；第8章为捷联式惯性导航系统的原理；第9章为捷联式惯导系统误差方程与初始对准技术；第10章为捷联式惯导系统的数字仿真方法；第11章为组合导航系统等。

尽管笔者力求使本书能更好地满足读者的要求，但因内容涉及面广，限于水平，书中不足之处在所难免，诚望读者批评指正。

编著者

2019年2月

目　录

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　导航的基本概念 …… 1
1.2　常用导航系统简介 …… 2
1.3　惯性导航系统的基本工作原理和分类 …… 5
1.4　惯性传感器技术的发展 …… 8
1.5　导航技术的新要求与惯性导航的关系 …… 12
思考与练习 …… 13

第 2 章　惯性导航的基本知识 …… 14

2.1　定点转动刚体的角位置描述 …… 14
2.2　惯性导航常用坐标系及其相互转换关系 …… 25
2.3　地球参考椭球及地球重力场特性 …… 33
2.4　绝对加速度、比力概念与比力方程 …… 41
2.5　舒勒摆原理和人工水平面的建立 …… 48
思考与练习 …… 52

第 3 章　转子陀螺仪基本理论及特性 …… 54

3.1　转子陀螺仪的力学基础 …… 54
3.2　转子陀螺仪的自由度和运动现象 …… 57
3.3　二自由度转子陀螺仪的进动性 …… 60
3.4　二自由度转子陀螺仪的定轴性 …… 64
3.5　单自由度转子陀螺仪的基本特性 …… 67
3.6　转子陀螺仪漂移及其数学模型 …… 69
思考与练习 …… 74

第 4 章　新兴陀螺仪与陀螺定向装置 …… 76

4.1　概述 …… 76
4.2　Sagnac 效应 …… 78
4.3　激光陀螺仪 …… 79
4.4　光纤陀螺仪 …… 87

需要全本请访问 www.ertongbook.com

4.5 微机电陀螺仪 …… 96
4.6 新概念陀螺仪 …… 100
4.7 陀螺定向装置 …… 103
思考与练习 …… 112

第 5 章 加速度计 …… 113

5.1 概述 …… 113
5.2 液浮摆式加速度计 …… 113
5.3 挠性加速度计 …… 119
5.4 硅微机电加速度计 …… 122
5.5 加速度计的数学模型 …… 129
思考与练习 …… 134

第 6 章 平台式惯性导航系统 …… 135

6.1 概述 …… 135
6.2 平台式惯性导航系统的基本原理 …… 137
6.3 比力方程和加速度信息的提取 …… 142
6.4 惯导平台的水平控制回路及其舒勒调谐的实现 …… 143
6.5 惯导系统中的高度计算 …… 147
6.6 指北方位平台式惯导系统的力学编排方程 …… 156
6.7 游动方位惯导系统的力学编排 …… 160
6.8 自由方位惯导系统及其机械编排 …… 168
思考与练习 …… 173

第 7 章 惯性导航系统误差方程与初始对准 …… 174

7.1 惯导系统的误差源 …… 174
7.2 真坐标系、平台坐标系和计算机坐标系 …… 175
7.3 系统误差方程的建立 …… 178
7.4 系统误差分析 …… 183
7.5 平台式惯导系统的初始对准 …… 198
思考与练习 …… 216

第 8 章 捷联式惯性导航系统 …… 217

8.1 捷联式惯导系统概述 …… 217
8.2 捷联式惯导系统的基本力学编排方程 …… 222

8.3　系统微分方程机上执行算法 …… 233
思考与练习 …… 239

第 9 章　捷联式惯导系统误差方程与初始对准 …… 240

9.1　概述 …… 240
9.2　捷联式惯导系统误差方程 …… 241
9.3　捷联式惯导系统的初始对准 …… 247
思考与练习 …… 259

第 10 章　捷联式惯导系统的数字仿真方法 …… 260

10.1　捷联式惯导系统数字仿真分类 …… 260
10.2　捷联式惯导系统数字仿真原理 …… 261
10.3　飞行轨迹发生器设计 …… 262
10.4　惯性元件的数学模型 …… 266
10.5　捷联式惯导系统导航解算 …… 269
10.6　误差处理器 …… 273
10.7　捷联式惯导系统的 Matlab 仿真实例 …… 273
思考与练习 …… 279

第 11 章　组合导航系统 …… 280

11.1　卡尔曼滤波原理 …… 280
11.2　卡尔曼滤波在组合导航中的应用方法 …… 285
11.3　惯性/GPS 组合导航系统 …… 291
11.4　惯性/天文组合导航系统 …… 318
思考与练习 …… 337

附录 …… 338

附录 1　常见的随机漂移误差模型 …… 338
附录 2　捷联矩阵的即时修正算法 …… 345
附录 3　弹道式飞行器轨迹设计方法 …… 348

参考文献 …… 357

第1章 绪 论

导航(Navigation)是一门古老而崭新、多学科交叉的学科,人类的文明史与其紧密相连。人类早期的导航发展史为我们留下了许多宝贵资料。今天,这些古老的导航方法随着电子、计算机、信息处理、空间技术和工业制造等科学技术的发展而不断发展。

1.1 导航的基本概念

一架飞机从一个机场起飞,希望准确地飞到另一个机场;一艘舰艇从一个港口出发,要顺利地行驶到另一个港口;一枚导弹从一个基地发射,要准确地命中所预定的目标……这些都必须依靠导航和制导技术。

导航,顾名思义就是引导航行的意思,也就是正确地引导航行体沿着预定的航线,以要求的精度,在指定的时间内将航行体引导至目的地。要使飞机、舰船等成功地完成所预定的航行任务,除了起始点和目标的位置之外,还需要随时知道航行体的即时位置、航行速度,航行体的姿态和航向等参数,这些参数通常称为导航参数。其中最主要的就是必须知道航行体所处的即时位置,因为只有确定了即时位置才能考虑怎样到达下一个目的地。如果连自己已经到了什么地方、下一步该到什么地方都不知道的话,那就无从谈起如何完成预定的航行任务。由此可见,导航问题对航行体来说是极为重要的。导航工作一般是由领航员完成的。但是,随着科学技术的发展,现在越来越多地使用导航仪器,使其代替领航员的工作而自动地执行导航任务。自然,能实现导航功能的仪器、仪表系统就叫作导航系统。当导航系统作为独立装置并由航行体带着一起作任意运动时,其任务就是为驾驶人员提供即时位置信息和航向信息。对航行体的作用就是操作人员按需要驾驶飞机或舰船,使之到达预定的目的地。

以航空为例,测量飞机的位置、速度、姿态等导航参数,通过驾驶人员或飞行自动控制系统引导其按预定航线航行的整套设备(包括地面设备)称为飞机的导航系统。导航系统只提供各种导航参数,而不直接参与对航行体的控制,因此它是一个开环系统。在一定意义上,也可以说导航系统是一个信息处理系统,即把导航仪表所测量的航行信息处理成所需要的各种导航参数。

所谓制导(Guidance),则是控制引导的意思,是指按选定的规律对航行体进行引导和控制,调整其运动航迹直至以允许误差命中目标或到达目的地。例如弹道导弹、人造卫星的运载火箭等,为了击中目标或将目标体送上一定的轨道,就必须根据测量仪器所测得的信息,使运载器准确地按时间,或按所达到的预定高度、速度及要保持的方位关掉发动机,此后,运载器受引力的作用继续飞行。制导系统主要由导引系统和控制系统两部分组成。导引系统一般包括

探测设备和计算机变换设备，其功能是测量航行体与目标的相对位置和速度，计算出航行体的实际运动航迹与理论航迹的偏差，并给出消除偏差的指令。控制系统主要由执行机构(伺服机构)组成。其功能是根据导引系统给出的制导指令和航行体的姿态参数形成综合控制信号，再由执行机构调整控制航行体的运动或姿态直至命中目标或到达目的地。

随着科学技术的发展，导航逐渐发展成为一门专门研究导航原理、方法和导航技术装置的学科。在舰船、飞机、导弹和宇宙飞行器等航行体上，导航系统是必不可少的重要设备。按照近代科技术语解释，导航的主要工作就是定位、定向、授时和测速。由于能够测得上述导航参数乃至完成导航任务的物理原理和技术方法很多，因此，便出现了各种类型的导航系统，例如无线电导航系统、卫星导航系统、天文导航系统和惯性导航系统，还有地标导航灯、灯光导航、红外线导航、激光导航、声呐导航及地磁导航系统等。

在重点介绍惯性元器件及惯性导航系统工作原理之前，下一节扼要地介绍无线电导航系统、卫星导航系统、天文导航系统、多普勒导航系统及组合导航系统，以拓宽读者在导航领域的知识视野。

1.2 常用导航系统简介

1. 无线电导航系统

无线电导航系统(Radio Navigation System)是利用无线电技术测量导航参数，包括多普勒效应测速、用雷达测距和测方位和用导航台定位等，它是一种广泛使用的导航系统。该系统的主要优点是不受使用时间、气候条件的限制，设备较为简单，可靠度较高等。尽管无线电导航系统的定位精度不受使用时间、气候条件的影响，但它的输出信息主要是载体位置，对精确导航系统来讲，其定位精度仍然不高，且工作范围受地面台覆盖区域的限制。这种系统的工作与无线电波传播条件有关，在某种程度上受人工干扰的影响。

2. 天文导航系统

天文导航系统(Celestial Navigation System，CNS)是用天文方法观测日月星辰等天体来确定航行体的位置，以引导航行体沿预定航线到达目的地的一种导航方法。它是一门古老而崭新的技术，在导航技术中占有重要的位置。

早期的天文导航是在航海方面发展起来的，利用六分仪人工观测星体高度角来确定航行体的位置。现在发展为通过星体跟踪器测量高度角及方位角，进而推算航行体在地球上的位置及航向。由于天体的坐标位置和它的运动规律是已知的，因此，只要测出天体相对于航行体参考基准面的高度角和方位角，就能够计算出航行体的位置和航向。利用光学或射电望远镜接收星体发射的电磁波去跟踪星体，在地球附近导航会受到云层及气象条件的限制，在空气稀

薄的高空和宇宙航行，则是比较理想的。根据跟踪的星体数，天文导航分为单星、双星和三星导航。单星导航航向基准误差大而定位精度低；双星导航定位精度高，当选择星对时，两颗星体的方位角差越接近90°，定位精度就越高；三星导航常利用对第三颗星的测量来检查对前两颗星测量的可靠性，在航天中，则用来确定航天器在三维空间中的位置。

天文导航系统是一种自主式导航系统，不需要地面设备的支持，也不向外辐射电磁波，隐蔽性好，与其他导航设备组合能够获得高精度的导航数据，且误差不随时间积累，因而得到了广泛应用。

3. 卫星导航系统

卫星导航系统(Satellite Navigation System)是继惯性导航之后导航技术的又一重大发展。可以说卫星导航是天文导航与无线电导航的结合物，只不过是把无线电导航台放在人造地球卫星上罢了。20世纪60年代初，旨在服务于美国海军舰只的第一代卫星导航系统——TRANSIT子午仪卫星导航系统出现了，它的全称为“海军导航卫星系统”。该系统用5～6颗卫星组成的星网工作，每颗卫星以150MHz和400MHz两个频率发射1～5W的连续电磁波信号。导航接收机利用测量卫星信号多普勒频移的方法，可以使舰船或陆上设备的定位精度达到500m(单频)和25m(双频)。由于卫星在600n mile[①]左右的低高度且飞越南北极的轨道上运行，因此导航数据不连续，平均每隔110min(赤道)或30min(纬度80°)才能定位一次；另一方面定位精度对用户的运动十分敏感，因此子午仪系统主要用于低动态的海军船只、潜艇、商业船只和路上用户。然而，子午仪系统显示了卫星定位在导航方面的巨大优越性，使得研发部门对卫星定位取得了初步的经验。

以全球定位系统(Global Positioning System，GPS)为代表的全球卫星导航系统是20世纪70年代由美国陆、海、空三军联合研制的新一代空间卫星导航定位系统。其主要目的是为陆、海、空三大领域提供实时、全天候和全球性的导航服务，并用于情报收集、核爆监测和应急通信等一些军事目的，是美国独霸全球战略的重要组成部分。经过20余年的研究试验，耗资300亿美元，到1994年3月，全球覆盖率高达98%的24颗GPS卫星星座已布设完成。GPS技术由于所具有的全天候、高精度和自动测量的特点，作为先进的测量手段，已经融入了国民经济建设、国防建设和社会发展的各个应用领域。

目前全世界有4套卫星导航系统，即中国北斗、美国GPS、俄罗斯“格洛纳斯”和欧洲“伽利略”。卫星导航系统是重要的空间基础设施，为人类带来了巨大的社会和经济效益。中国作为发展中国家，拥有广阔的领土和海域，高度重视卫星导航系统的建设，努力探索和发展拥有自主知识产权的卫星导航定位系统。

2000—2007年，中国先后成功发射了4颗“北斗导航试验卫星”，建成了北斗导航试验系

① 1 n mile=1 852m。

统(第一代系统)。这个系统具备在中国及其周边地区范围内的定位、授时、报文通信和GPS广域差分功能,并已在测绘、电信、水利、交通运输、渔业、勘探、森林防火和国家安全等诸多领域逐步发挥重要作用。

中国正在建设的北斗卫星导航系统空间段由5颗静止轨道卫星和30颗非静止轨道卫星组成,提供两种服务方式,即开放服务和授权服务(属于第二代系统)。开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务,定位精度为10m,授时精度为50ns,测速精度为0.2m/s。授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。我国正在实施北斗卫星导航系统建设,根据系统建设总体规划,2012年,系统首先具备覆盖亚太地区的定位、导航和授时以及短报文通信服务能力;2020年左右,建成覆盖全球的北斗卫星导航系统。

4. 多普勒导航系统

多普勒导航系统(Doppler Navigation System)是利用多普勒效应测定多普勒频移,从而计算出飞行器即时的速度和位置来实现导航的一种无线电导航系统。它由脉冲多普勒雷达、航向姿态系统、导航计算机和控制显示器等组成。多普勒雷达测得的飞行器速度信号与航向姿态系统测得的载体航向、俯仰和滚转信号一并送入导航计算机,计算出飞行器的地速矢量并对地速进行连续积分等运算,得出飞行器当时的位置,利用这个位置信号进行航线等计算,实现对飞行器的引导。它是一种自主式航位推算系统。

多普勒系统的工作方式是主动的,它不需要地面台,其测速精度约为航行速度的1/100~1/1 000,并且抗干扰能力较强。但是,它工作时由于必须发射电波,所以容易暴露自身。此外,它的工作性能与反射面的形状有关,如在水平面或沙漠上空工作时,由于反射性不好就会降低性能。同时,其精度也受天线姿态的影响,当接收不到反射波时就会完全丧失工作能力。

5. 组合导航系统

飞行器的发展对导航系统的精度、可靠性等都提出了越来越高的要求,从国防现代化的要求来讲,单一的导航系统已难以满足。组合导航技术是一种崭新的导航技术,它指的是综合两个或两个以上导航传感器的信息,使它们实现优势互补,以期提高整个系统的导航性能,来满足各类用户的需求。

组合导航系统(Integrated Navigation System)可分为重调式和滤波处理式两大类。若从设备类型来分,组合导航系统又可分为无线电导航系统间的组合和惯性导航系统与无线电导航系统(或天文导航)组合两大类。这里简要阐述重调式和滤波处理式的实现方式。

早期的组合导航系统采用重调法,它直接用一种导航系统的输出去校正另一种导航系统的输出,因此实现起来较容易。重调法对抑制惯导随时间增大的定位误差十分有效。因此,早期的惯导与无线电导航系统组合的系统大多采用重调法。重调法的缺点是组合效果差,组合

需要全本请访问 www.ertongbook.com

后的精度只能接近于被组合的精度较高的导航系统，而不可能比它更高。总之，组合的潜力远没有发挥出来。

自从20世纪60年代初出现了卡尔曼滤波技术，组合导航系统向更深层次发展才成为可能。卡尔曼滤波是一种线性最小方差滤波方法，它根据信号(或称作状态)和测量值的统计特性，从测量中得出误差最小，也即“最优”的信号估计，因此，经过滤波处理后导航解的精度可以比组合前任一导航系统单独使用时的精度高。另外，卡尔曼滤波采用递推计算方法，它不要求存储过去的测量值，只须根据当时的测量值和前一时刻的估计值，按照一组递推公式，利用数字计算机就可实时地计算出所需信号的估值。由于可进行传感器级的组合，滤波器处理的是原始测量值，因此，更有利于克服被组合设备各自的缺点和发挥各自的长处，从而达到最佳的组合效果。经卡尔曼滤波处理后的组合系统的精度要优于任一系统单独使用时的精度。

因此，导航技术向着组合方向发展是一个必然的趋势。当前，已经得到实际应用的组合导航系统主要有INS/GPS组合导航系统、INS/CNS组合导航系统和GPS/多普勒雷达组合导航系统等。

1.3 惯性导航系统的基本工作原理和分类

1.3.1 惯性导航系统的基本工作原理

假设汽车在公路上作匀速直线运动，其行驶的距离 s 取决于速度 v 与行驶时间 t，即

$$s = vt \tag{1.1}$$

若汽车作变速直线运动，速度为 $v(t)$，并设汽车初始位置为 X_0，则 t 时刻的汽车瞬时位置为

$$\boldsymbol{X}(t) = \boldsymbol{X}_0 + \int \boldsymbol{v}(t)\mathrm{d}t \tag{1.2}$$

又比如，一架飞机沿跑道滑行准备起飞，由于发动机的推力作用，它将以一定的加速度 $\boldsymbol{a}_0$ 从静止状态开始运动。随着时间的推移，其速度越来越大，直至离开地面以一定的速度向目的地飞行。显然，飞行的速度将取决于加速度的大小和作用的时间，亦即速度就是对加速度的积分，可表示为

$$\boldsymbol{v}(t_k) = \boldsymbol{v}(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} \boldsymbol{a}(t)\mathrm{d}t \tag{1.3}$$

式中，$\boldsymbol{v}(t_0)$ 为初始时刻载体的运动速度矢量(这里为零)。

而飞机的瞬时位置则取决于速度的大小和飞行时间，也就是说位置就等于对速度的积分，可写成

$$\boldsymbol{r}(t_k) = \boldsymbol{r}(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} \boldsymbol{v}(t)\mathrm{d}t \tag{1.4}$$

式中，$\boldsymbol{r}(t_0)$ 为初始时刻飞机的位置矢量。

惯性导航系统(Inertial Navigation System，INS，简称惯导系统) 就是采用了这样一种物理方法实现导航定位的。它用一种称为加速度计的仪表测量运载体的加速度，用陀螺稳定平台模拟当地水平面、建立一个空间直角坐标系，三个坐标轴分别指向东向 e、北向 n 及天顶方向 u，通常称为东北天坐标系。在载体运动过程中，利用陀螺使平台始终跟踪当地水平面，三个轴始终指向东、北、天方向。在这三个轴的方向上分别安装东向加速度计、北向加速计和垂直加速度计。东向加速度计测量载体沿东西方向的加速度 a_e，北向加速度计测量载体沿南北方向的加速度 a_n，而垂直加速度计则测量载体沿天顶方向的加速度 a_u。将这三个方向上的加速度分量进行积分，便可得到载体沿这三个方向上的速度分量为

$$\left.\begin{aligned} v_e(t_k) &= v_e(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} a_e \mathrm{d}t \\ v_n(t_k) &= v_n(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} a_n \mathrm{d}t \\ v_u(t_k) &= v_u(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} a_u \mathrm{d}t \end{aligned}\right\} \tag{1.5}$$

通常，载体在地球上的位置用经度、纬度和高程来表示，通过对速度积分就可得到。

$$\left.\begin{aligned} \lambda &= \lambda_0 + \int_{t_0}^{t_k} \dot{\lambda} \mathrm{d}t \\ L &= L_0 + \int_{t_0}^{t_k} \dot{L} \mathrm{d}t \\ h &= h_0 + \int_{t_0}^{t_k} \dot{h} \mathrm{d}t \end{aligned}\right\} \tag{1.6}$$

式中，λ_0, L_0, h_0 为载体的初始位置；$\dot{\lambda}, \dot{L}, \dot{h}$ 分别表示经度、纬度和高程的时间变化率，可由运动速度计算得到，即

$$\left.\begin{aligned} \dot{\lambda} &= \frac{v_e}{(N+h)\cos L} \\ \dot{L} &= \frac{v_n}{M+h} \\ \dot{h} &= v_u \end{aligned}\right\} \tag{1.7}$$

将式(1.7) 代入式(1.6)，就可得到载体的瞬时位置为

$$\left.\begin{aligned} \lambda &= \lambda_0 + \int_{t_0}^{t_k} \frac{v_e}{(N+h)\cos L} \mathrm{d}t \\ L &= L_0 + \int_{t_0}^{t_k} \frac{v_n}{M+h} \mathrm{d}t \\ h &= h_0 + \int_{t_0}^{t_k} v_u \mathrm{d}t \end{aligned}\right\} \tag{1.8}$$

式中，M，N 分别表示地球椭球的子午圈、卯酉圈曲率半径。若地球近似看成是一个半径为 R 的球，那么 $M=N=R$。

应指出，由于初始位置（λ_0，L_0，h_0）须事先已知并输入惯导系统，所以惯性导航属于相对定位。

1.3.2　惯性导航系统的分类

由上述惯导系统的定位原理可以看出，一个完整的惯导系统应包括以下几个主要部分：

① 加速度计。用于测量航行体的运动加速度，通常应有 2～3 个，并安装在三个坐标轴方向上。

② 陀螺稳定平台。为加速度计提供一个准确的坐标基准，以保持加速度计始终沿三个轴向测定加速度，同时也使惯性测量元件与航行体的运动相隔离。

③ 导航计算机。用来完成诸如积分等导航计算工作，并提供陀螺施矩的指令信号。

④ 控制显示器。用于输出显示导航参数等，还可进行必要的控制操作，如输入初始数据等。

⑤ 电源及必要的附件等。

按惯性测量装置在载体上的安装方式，可分为平台式惯性导航系统和捷联式惯性导航系统。

平台式惯性导航系统是将惯性测量元件安装在惯性平台（物理平台）的台体上。根据平台所模拟的坐标系不同，平台式惯性导航系统又分为空间稳定惯性导航系统和当地水平面惯性导航系统。前者的平台台体相对惯性空间稳定，用来模拟某一惯性坐标系。重力加速度的分离和其他不需要的加速度的补偿全依靠计算机来完成。这种系统多用于运载火箭主动段的控制和一些航天器上。而后者的平台台体则模拟某一当地水平坐标系，即保证两个水平加速度计的敏感轴线所构成的基准平面始终跟踪当地水平面。这种系统多用于在地表附近运动的飞行器，如飞机和巡航导弹等。平台式惯导系统的平台能隔离载体的角振动，给惯性测量元件提供较好的工作环境。由于平台直接建立起导航坐标系，因此提取有用信号需要的计算量小，但结构复杂，尺寸大。平台式惯性导航系统的原理示意图如图 1-1 所示。

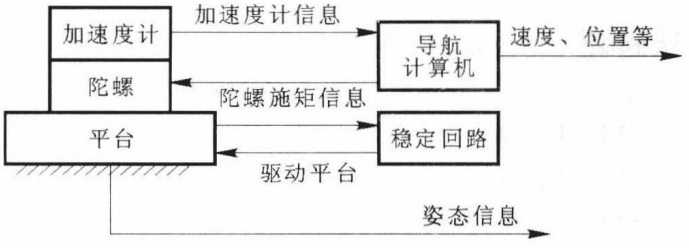


图 1-1　平台式惯性导航系统原理示意图

捷联式惯性导航系统是将惯性测量元件直接安装在载体上，没有实体平台，惯性元件的敏感轴安置在载体坐标系的三轴方向上。它用存储在计算机中的“数学平台”代替平台式惯导系统中物理平台的台体。在运动过程中，陀螺测定载体相对于惯性参照系的运动角速度，并由此计算载体坐标系至导航（计算）坐标系的坐标变换矩阵。通过此矩阵，将加速度计测得的加速度信息变换至导航（计算）坐标系，然后进行导航计算，得到所需要的导航参数。由于省去了物理平台，因此与平台式惯性导航系统相比较，捷联式惯性导航系统的结构简单，体积小，维护方便。但惯性测量元件直接装在载体上，工作条件不佳，降低了仪表的精度。由于三个加速度计输出的加速度分量是沿载体坐标系轴向的，须经计算机转换成导航坐标系的加速度分量（这种转换起着“数学平台”的作用），因此计算量要大得多。

图 1-2 是捷联式惯性导航系统的原理示意图。惯性元件直接固联到载体上，陀螺测得的角速度信息用于计算坐标变换矩阵（载体坐标系至导航坐标系）。利用该矩阵，可以将加速度计的量测量变换至导航（计算）坐标系，然后进行导航参数的计算。同时，利用坐标变换矩阵的元素，提取姿态信息。

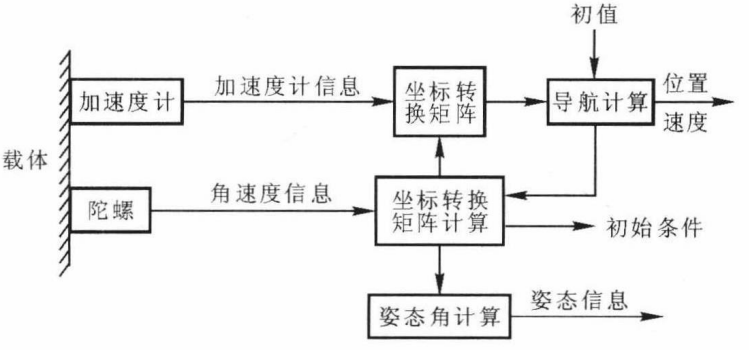


图 1-2　捷联式惯性导航系统原理示意图

1.4　惯性传感器技术的发展

1.4.1　惯性传感器的定义

陀螺仪和加速度计是惯性导航（或制导）系统中的两个关键部件。

陀螺仪是感测旋转的一种装置，其作用是为加速度计的测量提供一个参考坐标系，以便把重力加速度和载体加速度区分开，并可为惯性系统、火力控制系统和飞行控制系统等提供载体的角位移或角速率。随着科学技术的发展，人们已发现有 100 种以上的物理现象可被用来感测载体相对于惯性空间的旋转。从工作机理来看，陀螺仪可分为两大类：一类是以经典力学为

基础的陀螺仪(通常称为机械陀螺),另一类是以非经典力学为基础的陀螺仪(如振动陀螺、光学陀螺和硅微陀螺等)。

加速度计又称比力敏感器,它是以牛顿惯性定律作为理论基础的。在运动体上安装加速度计的目的,是用它来敏感和测量运动体沿一定方向的比力(即运动体的惯性力与重力之差),然后经过计算(一次积分和二次积分)求得运动体的速度和所行距离。测量加速度的方法很多,有机械的、电磁的、光学的和放射线的等。按照作用原理和结构的不同,惯性系统使用的加速度计可分为两大类,即机械加速度计和固态加速度计。

惯性导航和制导系统对陀螺仪和加速度计的精度要求很高,如加速度计分辨率通常为0.000 1g ~0.000 01g,陀螺随机漂移率为0.01°/h甚至更低,并且要求有大的测量范围,如军用飞机所要求的测速范围应达10^8(0.01°/h ~ 400°/s)。因此,陀螺仪和加速度计属于精密仪表范畴。

1.4.2 陀螺仪的分类及发展概况

1. 经典力学陀螺仪

经典力学陀螺仪主要有速率陀螺、液浮速率积分陀螺、双轴液浮陀螺、球形自由转子陀螺、挠性陀螺、动力调谐陀螺和静电陀螺等。

(1) 液浮速率积分陀螺

这是1955年由美国率先研制成功的世界上第一种惯性级(即陀螺随机漂移达到0.01°/h量级)陀螺仪。它是在速率陀螺的基础上,通过采用力矩电动机使其闭环工作而构成的。由于它通过浮子组件消除了框架支撑的干摩擦,因而陀螺精度提高了1 ~ 2个数量级,在飞行器导航和制导系统中得到了广泛应用。

为了进一步提高陀螺精度,此后在输出轴采用液浮技术的基础上又增加了动压气浮轴承和磁悬浮系统,从而构成了所谓的“三浮”陀螺。这种陀螺是目前战略武器用高精度惯性系统的心脏。

(2) 动力调谐陀螺

在这种陀螺中,转子是由挠性接头支撑的。后者是一种无摩擦的弹性支撑,它可通过自身的变形来给陀螺转子提供所需的转动自由度,这样就不再需要铰链式的支撑方式,也就彻底避免了干摩擦。而对于挠性支撑本身的弹性恢复力矩,则采用了平衡环的动力力矩来予以克服,这种补偿方法被称为动力调谐,这也是动力调谐陀螺名字的由来。

相对第一代的液浮陀螺来说,动力调谐陀螺为第二代陀螺。由于其结构比较简单,因而成本较低。在经历多年的研制后,到20世纪70年代中期,动力调谐陀螺已达惯性级,并成为70—80年代飞机惯导系统主要采用的一种陀螺仪。

(3) 静电陀螺

静电陀螺仪利用电极对球形转子的静电吸力,以及自动调节电极电压的方法,使球形转子支撑在电极中心;并采用光电测量方法测出壳体相对转子极轴的转角。它消除了框架陀螺和挠性陀螺由于机械连接所引起的干扰力矩,也避免了液浮陀螺由于液体扰动所引起的干扰力矩,因此是一种高精度陀螺仪。但由于其工艺复杂,因而成本较高。

静电陀螺仪原理是20世纪50年代初提出的,直到70年代末才进入实用。经过逐步改进,静电陀螺仪精度已高达0.000 1°/h。它特别适合于高精度惯导系统应用,曾被用于B—52远程战略轰炸机和F—117A隐身战斗轰炸机,用它构成的静电陀螺监控器现在是核潜艇惯导系统的主要组成部分。

2. 非经典力学新型陀螺仪

这类陀螺主要有振动陀螺(包括石英速率陀螺、半球谐振陀螺等)、光学陀螺(主要有环形激光陀螺、三轴整体式环形激光陀螺、干涉型光纤陀螺、光纤环形谐振陀螺、环形谐振陀螺等)以及硅微机械陀螺。

(1) 环形激光陀螺

1963年,美国首先向世界公布了激光陀螺的概念。但直到1981年,激光陀螺才首次被用于当时新生产的波音747飞机的惯导系统中。接着于1983年开始批量生产,其间经历了长达20年的研制周期。激光陀螺长期不能进入实用的主要原因在于材料和加工工艺上的困难。

激光陀螺仪是以激光作为介质,以近代物理学中的萨格奈克(Sagnac)效应作为理论基础做成的一种感测角速度的装置。它不使用机械转子,而是使用沿闭合光路运行的正、反两个激光光束间的谐振频率差,以此测定相对惯性空间的转速和转角。激光陀螺由于没有高速旋转的活动件,因而也被称为固态陀螺仪。激光陀螺具有机械陀螺无法比拟的优点,是捷联惯性系统理想的元件。自20世纪80年代中期至今,在覆盖军用机和民用机的绝大部分飞机的捷联惯性系统中,激光陀螺已处于主导地位。

(2) 光纤陀螺

1975年,美国率先在世界上提出了光纤陀螺的设想,至20世纪90年代中期,光纤陀螺开始走向实用,最初用于战术导弹制导及飞机航姿系统中。

光纤陀螺是采用光纤作为光路,并基于萨格奈克效应的一种新型光学陀螺。当陀螺相对惯性空间旋转时,由相位测量电路提供输出的这种陀螺通常被称为干涉型光纤陀螺,它由发光二极管、波束分离器、光纤以及相位探测器等部分组成。光纤陀螺没有困扰激光陀螺的闭锁问题;与激光陀螺一样,同样没有活动部件;它具有很宽的动态范围和低的制造成本。受到光纤技术商业开发推动的光纤陀螺,性能很快地达到甚至超过激光陀螺,1998年,达到惯性级的光纤陀螺已被研制出来。目前,国外研制的光纤陀螺零位漂移已达到0.001°/h以内,测量精度达到了0.000 3°/h,已能够满足各类武器系统导航制导的需求。

需要全本请访问 www.ertongbook.com