

专著 西北工业大学
出版资助项目
ZIZHU XIANGMU

ZHUANZHU

组合导航原理及应用

高社生 何鹏举 杨波 魏文辉 编著

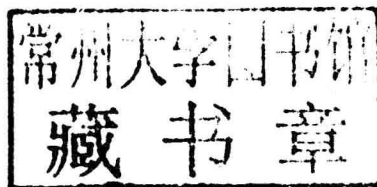
ZHUANZHU

西北工业大学出版社

西北工业大学出版基金资助项目

组合导航原理及应用

高社生 何鹏举 杨波 魏文辉 编著



西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是国防科学技术领域研究先进组合导航技术的一部专著。书中在介绍导航基本概念和惯性导航系统的基础上,以组合导航系统为核心,对工程技术中常用的几种组合导航系统做了认真研究。全书共 11 章。内容包括:绪论,地球参考模型及常用导航坐标系,惯性导航系统,组合导航基本原理,组合导航滤波算法,INS/GPS 组合导航系统,SINS/CNS 组合导航系统,INS/SAR 组合导航系统,地形辅助惯性导航系统,SINS/北斗组合导航系统,其他惯性组合导航系统。

本书国防特色鲜明,内容先进,技术性强,语言通俗,图文并茂,技术与应用并重,理论与实践结合,具有较高的学术水平和工程应用参考价值。

本书特别适用于航空、航天、航海、交通等领域中从事导航定位工作与学习的广大教师、研究生、高年级本科生学习和参考,也可供从事国防建设的广大科学技术人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

组合导航原理及应用/高社生等编著. —西安:西北工业大学出版社,2012.9
ISBN 978-7-5612-3472-3

I. ①组… II. ①高… III. ①组合导航—研究 IV. ①TN967.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 221869 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:陕西兴平报社印刷厂

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:17.125

字 数:368 千字

版 次:2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

定 价:45.00 元

前 言

导航(Navigation)是一门古老而崭新、多学科交叉的科学,人类的文明史与其紧密相连。人类早期的导航方法随着岁月的流逝,为人们留下了导航发展史上的许多宝贵资料。今天,这些古老的导航方法随着电子、计算机、自动化、信息处理、空间技术、工业制造等科学技术的发展而发展。现代各种先进的导航系统正是以这些技术为基础,掀起了人类导航史上一场新的技术革命。

科学技术的迅速发展,特别是现代化战争,对导航定位的精度和可靠性提出了愈来愈高的要求。从国防现代化的要求来讲,单一导航系统已难以满足要求。以惯性导航系统为主,用GPS、GLONASS、多普勒雷达、无线电导航、地形匹配等其中一种或几种构成组合导航系统,能达到取长补短、综合发挥各种导航系统优点的目的,并能提高导航信息精度,更好地满足载体对导航系统的要求。因此,导航技术向着组合方向发展是一个必然的趋势。

本书是国防科学技术领域研究先进组合导航技术的一部专著。书中在介绍导航基本概念和惯性导航系统的基础上,以组合导航系统为核心,对工程技术中常用的几种组合导航系统做了认真研究。全书共11章。第1章是绪论,介绍导航系统的发展、导航的基本概念和常用导航系统;第2章介绍地球参考模型、常用导航坐标系及坐标系间的转换;第3章介绍惯性导航系统的基本原理,重点研究平台式惯性导航系统和捷联式惯性导航系统的力学编排方程和误差模型;第4章介绍组合导航的基本概念;第5章介绍组合导航滤波算法;第6章论述INS/GPS组合导航系统的原理、组合方式和滤波方法;第7章研究SINS/CNS组合导航系统;第8章主要研究INS/SAR组合导航系统的工作原理、数学模型、运动补偿和误差修正技术;第9章研究地形辅助的惯性导航系统的数学模型、关键技术、工程应用及其新进展;第10章对SINS/北斗组合导航系统进行探索性研究;第11章分别研究INS/GPS/SAR组合导航系统、地形辅助的INS/SAR组合导航系统、INS/SAR/罗兰—C组合导航系统、SAR/单轴稳定SINS组合导航系统、SINS/CNS/SAR自主组合导航系统、GPS/DR车辆组合导航系统和SINS/DR车辆组合导航系统,并对车辆导航北斗双星定位技术作了简要介绍。

本书是笔者近年来科研成果的结晶,也是笔者对国内外航空、航天领域近十几年来组合导航定位技术研究成果的总结。其中包括笔者近年来在教学、科研和指导研究生过程中对导航知识的不断学习、研究、认识和探索的部分成果,相当一部分内容是在本人教案、著作和科研论文的基础上加以系统整理与精心编著而成的。书中针对当前世界导航技术的发展趋势及我国飞行器导航技术的实际情况,对组合导航系统进行了理论研究及工程应用探讨,比较全面、系统地介绍了导航定位和探测领域的基础知识和主要技术。

从导航系统的发展趋势和国防事业的发展要求来看,任何单一的导航系统都难以满足军用飞机和武器装备的要求。因此,国防院校的广大青年学生和从事国防建设的广大科技人员急需掌握先进组合导航系统的专门知识。本书正是基于这一需要而编著的。

本著作国防特色鲜明,内容先进,技术性强,语言通俗,图文并茂,技术与应用并重,理论与实践结合,具有较高的学术水平和工程应用参考价值。本书特别适用于航空、航天、航海、交通等领域中从事导航定位工作与学习的广大教师、研究生、高年级本科生学习和参考,也可供从事国防建设的广大科学技术人员阅读、参考,希望能够对他们提供有益的帮助。

本书第1,2,4,5,8,11章由高社生执笔,第6,7章由何鹏举执笔,第3章由杨波执笔,第9,10章由魏文辉执笔,全书由高社生统稿。西北工业大学研究生张极对本书的文字进行了认真较对。

本书得到了国家自然科学基金、武器装备预研基金、航天科技创新基金和西北工业大学专著出版基金的资助,西北工业大学出版社的领导和同志们对本书的出版给予了大力支持,笔者在此向他们一并表示感谢。

由于水平有限,书中错误在所难免,如蒙读者指正,笔者深表感谢。

编著者

2012年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导航系统的发展	1
1.2 导航的基本概念	3
1.3 导航系统简介	4
1.4 小结	9
第 2 章 地球参考模型及常用导航坐标系	10
2.1 地球的几何形状	10
2.2 地球的重力场	14
2.3 垂线、纬度及高度的定义	15
2.4 导航常用坐标系及坐标系间的转换	16
2.5 小结	20
第 3 章 惯性导航系统	21
3.1 惯性导航原理	21
3.2 惯性导航系统的分类	25
3.3 平台式惯性导航系统的力学编排方程	28
3.4 平台式惯性导航系统的误差模型	31
3.5 捷联式惯性导航系统的力学编排方程	36
3.6 捷联式惯性导航系统的误差模型	39
3.7 速率偏频激光陀螺仪惯性导航系统	43
3.8 小结	50
第 4 章 组合导航基本原理	51
4.1 组合导航的基本原理	51
4.2 组合导航的基本结构	54
4.3 组合导航的工作模式	56

4.4	组合导航的误差估计与修正	58
4.5	组合导航的基本特性	59
4.6	组合导航的发展	60
4.7	小结	62
第5章	组合导航滤波算法	63
5.1	Kalman 滤波算法	63
5.2	自适应 Kalman 滤波算法	70
5.3	联邦 Kalman 滤波算法	76
5.4	组合导航非线性滤波算法	79
5.5	小结	90
第6章	INS/GPS 组合导航系统	92
6.1	INS/GPS 组合导航系统原理	92
6.2	INS/GPS 组合导航系统的硬件实现方式	94
6.3	SINS/GPS 组合导航系统的软件实现方式	96
6.4	分布式滤波与全组合滤波	103
6.5	INS 用于周跳的检测与模糊度参数修复	108
6.6	GPS 辅助 INS 提高惯性平台姿态精度	110
6.7	小结	113
第7章	SINS/CNS 组合导航系统	114
7.1	天文导航系统概述	114
7.2	SINS/CNS 组合导航系统原理	118
7.3	SINS/CNS 组合导航系统的数学模型	120
7.4	SINS/CNS 组合导航系统的计算机仿真	125
7.5	SINS/CNS 组合导航系统的特点及应用	129
7.6	小结	132
第8章	INS/SAR 组合导航系统	133
8.1	合成孔径雷达的基本理论	133
8.2	INS/SAR 组合导航系统的原理	137
8.3	INS/SAR 组合导航系统的数学模型	141
8.4	SAR 的运动补偿	146
8.5	主 INS 和天线附加的 IMU 之间的传递对准	159

8.6	INS 的误差修正	162
8.7	小结	167
第 9 章	地形辅助惯性导航系统	168
9.1	地形辅助导航系统概述	168
9.2	地形辅助导航系统的类型	170
9.3	地形辅助惯性导航系统的数学模型	172
9.4	地形辅助导航系统的关键技术	181
9.5	地形辅助导航系统的应用及其新进展	193
9.6	小结	198
第 10 章	SINS/北斗组合导航系统	199
10.1	北斗导航系统概述	199
10.2	北斗导航系统的定位原理及误差分析	202
10.3	SINS/北斗双星组合导航系统的数学模型	203
10.4	SINS/北斗组合导航系统的计算机仿真	205
10.5	小结	207
第 11 章	其他惯性组合导航系统	208
11.1	INS/GPS/SAR 组合导航系统	208
11.2	地形辅助的 INS/SAR 组合导航系统	218
11.3	INS/SAR/罗兰—C 组合导航系统	221
11.4	SAR/单轴稳定 SINS 组合导航系统	226
11.5	SINS/CNS/SAR 自主组合导航系统	228
11.6	GPS/DR 车辆组合导航系统	237
11.7	SINS/DR 车辆组合导航系统	247
11.8	车辆导航北斗双星定位技术	255
11.9	小结	256
参考文献		257

第1章 绪论

导航(Navigation)是一门古老而崭新的、多学科交叉的科学,人类的文明史与其紧密相连。人类早期的导航方法随着岁月的流逝,为人们留下了导航发展史上的许多宝贵资料。今天,这些古老的导航方法随着电子、计算机、自动化、信息处理、空间技术、工业制造等科学技术的发展而发展。现代各种先进的导航系统正是以这些技术为基础,掀起了人类导航史上一场新的技术革命。

1.1 导航系统的发展

首先需要指出,最早、最原始的导航方法是我们祖先发明的指南针,这是中华民族对世界航海事业的杰出贡献。

早期,人们还利用地标进行导航^[1],即利用在地图或海图上已标明位置的地物、地标(岛屿、航标和特殊建筑物等),在载体上用光学等方法,通过测向或测距确定出航行体的地理位置。在古代,我们的祖先一直在利用天上的星星进行导航,最简单的导航方法是目视定位法。为了适应远距离、长时间导航的需要,人们开始观察日月星辰,特别是利用北极星来确定方向。早在 17 000 年以前的古石器时代,当时为了进行打猎等活动,人们利用了简单的恒星导航方法,这就是最早的天文导航方法^[2]。2 000 年以前,我国就有将天文方法用于导航的记录。

最早的导航传感器可以追溯到 4 000 多年前,黄帝与蚩尤在黄河流域作战时为辨别方向以追击敌人而使用的指南车。我们祖先的四大发明之一——指南针,就是指南车的简化,它为促进世界航海事业的发展做出了巨大贡献。现有的导航传感器包括:六分仪、磁(无线电)罗盘、空速表、气压高度表、惯性传感器(主要是陀螺和加速度计)、雷达、星体跟踪器、信号接收机、电光系统等。这些传感器为航行体提供了航行的方向、高度、速度、姿态、位置、时间、图像等方面的信息,并且越来越精确、可靠,其体积、质量、成本和功耗也不断减小。比如,现在能够在 1 cm^2 的硅芯片上制作微型固态惯性传感器。

随着科学技术与导航技术的发展,又出现了大气数据航程推算法(也叫仪表领航法)、无线电导航法、惯性导航法、卫星导航法、电视导航法、自动地图导航法、组合导航法等导航方式。相应地,各种导航系统也出现和发展起来了。

以航空导航为例,从 20 世纪二三十年代开始,飞机上出现了仪表导航系统。20 世纪 30 年代出现了无线电导航,即依靠飞机上的信标接收机和无线电罗盘来获得地面导航台的信息

以进行导航。20 世纪 40 年代开始研制超短波的伏尔加导航系统,这是一种近距离的无线电导航系统。自 1942 年德国在 V-2 火箭上首次应用惯性制导技术后,1954 年惯性导航系统在飞机上试飞成功,1958 年“缸鱼”号潜艇依靠惯性导航系统穿过北极,在冰下航行 21 天。惯性导航或制导系统在舰船、飞机、导弹等运载体的导航制导中都获得了成功的应用,从而开创了惯性导航时代。

惯性导航系统(Inertial Navigation System,INS)是利用惯性敏感元件测量载体(飞机、舰船、火箭等)相对于惯性空间的线运动和角运动参数,在给定初始条件和完成初始对准之后,由计算机计算出载体的姿态、方位、速度、位置等导航参数,以便引导载体完成预定的航行任务。惯性导航系统能够完全自主地提供连续、完备的导航信息,具有自主的导航能力,可以独立给出载体的姿态、速度和位置等导航信息,抗外界干扰能力强,短期稳定性好,导航精度基本不受载体机动性能的影响,相对导航精度较高。目前,惯性导航系统在航空、航天和航海等各种领域内已得到了广泛应用。尤其对于军用领域来说,目前还没有任何一种其他导航系统能够代替它。随着导航技术的发展,惯性导航系统已不再是单纯的导航设备,而成了飞机上的中心信息源,同时也执行飞机控制、武器投放、发动机控制、座舱显示,以及传感器的稳定等功能。因此,它被广泛地安装于运载体上。

20 世纪 50 年代出现了卫星导航系统。1957 年 10 月,世界上第一颗卫星发射成功后,利用卫星进行导航定位的研究工作被提到了议事日程。1958 年年底,美国海军武器实验室委托霍布金斯大学应用物理实验室研究为美国军用舰艇导航服务的卫星系统,即海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System,NNSS)。在这一系统中,由于卫星的轨道都通过地极,所以又称为子午仪卫星导航系统(Transit)。1964 年 1 月该系统研制成功,用于北极星核潜艇的导航定位,并逐步用于各种军舰的导航定位。1967 年 10 月,经美国政府批准,对其广播星历解密并提供民用,为远洋船舶和海上定位服务,由此显示出了卫星定位的巨大潜力。接着,美国对子午仪卫星定位技术进行了一系列的研究,提高了卫星轨道测定的精度,改进了用户接收机的性能,使定位精度不断提高,自动化程度不断完善,使用范围越来越广。海上石油勘探、钻井定位、海底电缆铺设、海洋调查与测绘、海岛联测以及大地控制网的建立等方面都相继使用,成为全球定位和导航的一种新手段。

20 世纪 60 年代开始使用远程无线电罗兰—C 导航系统,同时还研制出塔康导航系统及远程欧米茄导航系统,并出现了自动天文导航系统。20 世纪 60 年代以后,无线电导航得到进一步发展,并与人造卫星导航相结合,发展成为全球定位系统(Global Positioning System, GPS),简称为 GPS。20 世纪 70 年代以后,全球定位系统得到进一步发展和应用。

在此过程中,为了发挥不同导航系统的优点,使其互为补充,出现了各种组合导航系统,它们主要以惯性导航系统为基准。

20 世纪 80 年代以后,导航系统主要朝着以惯性导航系统为基础的组合导航方向发展。可供组合的传感器除了 GPS 外,还有星光、地形及各种无线电导航装置。惯性导航系统在导航中则占有着非常重要的地位,惯性导航系统与其他系统组合,构成的惯性组合式系统是未来

导航系统的发展方向。

20 世纪 80 年代以来,地形辅助导航(Terrain Assisted Navigation, TAN)系统受到广泛重视,并得到成功使用。它与一般组合导航系统相比,只增加了唯一的硬件——存储数字地形高度数据的大容量存储器,而且隐身式无线电高度表向下发射的旁瓣小、能量低,几乎不会被发现和干扰。尤其是在低高度,特别是在山丘地带,由于 GPS 能观察到的导航星少,很难达到完善的几何精度,其导航精度显著下降,而此时 TAN 正处于最佳状态。但是, TAN 在平坦地形和海面上空几乎失去对惯导系统提供位置修正的能力,而且基本上只能在低高度使用。另外,与高程相关的位置精度也并非所期望得那样高,通常为 60~100 m。

20 世纪末,随着机载数字地图、实时图像处理、硬件与软件的飞速发展,合成孔径雷达(SAR)修正 INS 的一种新体制已经出现。INS/SAR 组合导航系统就是把 SAR 获得的实时图像与事先存储的数字地图相比较,其结果用来修正 INS。INS/SAR 组合导航系统现已能够达到 GPS 的 P 码定位精度。这样高的精度和其完全的自主能力,是颇具吸引力的。

1.2 导航的基本概念

导航是一门研究导航原理、导航技术及装置的学科。导航系统是确定航行体位置和方向,并引导其按预定航线航行的整套设备(包括航行体上的、地面上的以及空间的设备)。导航系统现已广泛地应用于汽车、坦克、舰船、各种飞行器、自主式机器人以及石油钻井等方面。

本书主要介绍导航系统,对于制导系统只是附带介绍。下面简要地介绍一下导航的基本概念。

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,就必须依靠导航和制导技术。尽管导航系统和制导系统在许多方面有共同之处,但在某些方面各自的特点是明显的,因此对二者加以区分是必要的。

导航(Navigation),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、在指定的时间内到达目的地^[3]。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、姿态、航向等参数,这些参数通常称做导航参数。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的问题。如果连自己已经到了什么地方,下一步该到什么地方也不知道的话,那就无从谈起完成预定的航行任务。由此可见,导航问题对飞行来说是极为重要的。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。能实现导航功能的仪器、仪表系统就称做导航系统。当导航系统作为独立装置并由航行体带着一起做任意运动时,其任务就是为驾驶人员提供即时位置信息和航向信息。对航行体的作用就只限于影响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航行的控制。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需要的各种导航参数。

所谓制导(Guidance),则是控制引导的意思,也就是使航行体按一定的运动轨迹或根据所给的指令运动,以便达到预定的目的地或攻击预定的目标^[2]。例如弹道火箭、人造卫星的运载火箭或宇宙探测器等,为了击中目标或飞达一定的轨道,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要达到的预定高度、速度,以及要保持的方位后关掉发动机,此后运载器就受引力的作用继续飞行。实现制导功能的仪器、仪表系统称做制导系统。也就是把导航系统和自动驾驶系统组合在一起成为一个闭环系统,把导航系统提供的导航信息转换成对航行体航行的控制信息送给自动驾驶系统,通过自动驾驶系统自动地控制航行体的航行,这样的闭环系统就是制导系统或航行自动控制系统。此外,如无人驾驶飞机,按事先设计的轨迹或随地面的引导信息飞向目的地,这和一般有人驾驶飞机的情况有很大差别,因而它也属于制导的范畴。

在舰船、飞机、导弹、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,导航的主要工作就是定位、定向、授时和测速。导航需要连续提供此类信息,运动愈快,更新愈快,愈无法要求过高的精度。相比而言,精密定位则是导航的一个极端情况,虽然也定位甚至定向,但并不要求实时性,对精度要求却很高(cm级或mm级)。由于能够测得上述导航参数乃至完成导航任务的原理和技术方法很多,所以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。

1.3 导航系统简介

导航系统可以分为自主式导航系统和非自主式导航系统。把不需要任何外界条件帮助就能完成导航任务的导航系统叫做自主式导航系统,而将需要依赖外界条件的帮助才能完成导航任务的导航系统称为非自主式导航系统。惯性导航系统是当前航空、航天和航海等领域中广泛使用的导航设备。全球定位系统则是在航天技术出现后发展起来的一种新的导航定位方法。除了这两种重要的导航系统之外,还有许多其他重要的导航方法。下面介绍几种典型的导航系统。

1.3.1 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)是利用无线电引导飞行器沿规定的航线,在

规定的时间内到达目的地的航行技术。利用无线电波的传播特性可以测量飞行器的导航参数(方位、距离和速度),算出与规定航线的偏差,由驾驶员或自动驾驶仪操纵飞行器消除偏差,以保持飞行器沿航线飞行。无线电导航系统是一种广泛使用的非自主式导航系统。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,相对于精确导航系统来讲,其定位精度仍然不高,且工作范围受地面电台覆盖区域的限制。这种系统的工作与无线电波传播条件有关,在某种程度上容易受到人工干扰的影响。

无线电导航技术的发展趋势主要有两个方面^[4]:①充分利用现有的无线电导航系统。利用现代科技成果对其改造,进一步提高无线电导航定位系统的可靠性和精度。运用新技术、新工艺研制更新的无线电导航设备,使导航设备微型化、自动化程度更高。②采用组合导航方式。载体上配备多种无线电导航和其他导航设备,通过计算机信息处理获得最佳的导航参数,从而提高整个导航系统的精度、可靠性,降低对子导航系统质量的要求。因此,组合导航是无线电导航发展的一个明显方向。

2. 卫星导航系统

卫星导航(Satellite Navigation)是采用导航卫星对地面、海洋、空中和空间用户进行导航定位的技术。它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,不过是把无线电导航台放在人造地球卫星上罢了。当然,这种导航方法只有在航天技术充分发展的今天才有实现的可能。20世纪60年代初,旨在服务于美国海军舰船的TRANSIT子午仪卫星导航系统出现。20世纪70年代它被提供给民用,利用装在航行体上的接收机接收导航卫星发播的无线电信号,并测量因卫星相对用户接收机不断运动而产生的多普勒频移,由此确定航行体在地球上的位置等导航参数。作为第一代卫星导航系统,子午仪系统实现了全球范围内的全天候导航,并在大地测量、精密定位、高精度授时、监测地球自转等方面得到广泛应用,显示了卫星导航定位的优越性。

全球定位系统(GPS)是美国国防部研制的第二代卫星导航系统。早在1964年,子午仪系统投入使用后不久,尽管该系统在作用范围和导航精度上都较已有的导航系统(如罗兰—C、欧米茄等)优越,但是子午仪系统的单星、低轨、测速体制限制了它在陆地、空中(不知高程)和高动态用户的应用。即使是对海上用户而言,由于它在时间上的不连续(间隔约1.5h的断续定位),也需要和惯性导航系统结合,而不能作为一种独立的导航手段。正是由于这些原因,美国空军、海军在它投入使用后不久,就开始研究取代它的新一代卫星导航系统,分别提出了“621B”计划和“TIMATION”(交换位置)计划。这两个方案差别很大,各有优、缺点。海军的“TIMATION”方案基本上是一个二维系统,而且在高动态环境中缺乏连续更新位置的能力。空军的“621B”方案,虽然能在高动态环境下工作,但为了能提供全球覆盖,至少需要4个分离的卫星星座,每个星座需要一个独立的地面控制站为它服务。1973年,美国国防部在这两个方案的基础上,决定发展各军兵种共同使用的国防卫星导航系统,即GPS。这项计划由空军牵头负责研制,并专门设立了一个联合办公室,具体负责GPS的研制、试验、采购和部署,参加

单位有空军、海军、陆军、海军陆战队、海岸卫队、运输部、国防部制图局和国防预研计划局。1978年,一些北大西洋公约组织的国家与美国签订了一项谅解备忘录,同美国一起参加GPS的研制与部署,这些国家包括比利时、加拿大、丹麦、法国、德国、意大利、荷兰、挪威和英国。澳大利亚也通过双边协议参加了GPS计划。目前,GPS应用的范围、深度以及基于GPS的许多组合系统、复合系统和间接应用等还处于不断探索中。

卫星导航系统综合了传统导航系统的优点,真正实现了在各种气象条件下的全球高精度被动式导航定位。特别是时间测距卫星导航系统,不但能提供全球和近地空间连续立体覆盖、高精度三维定位和测速,而且抗干扰能力强。

卫星导航系统的发展趋势是实现全球连续、实时、高精度导航,降低用户设备价格,建立导航与通信、航海交通管制、授时、搜索营救、大地测量及气象服务等多用途的综合卫星系统^[5]。

3. 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。

天文导航最早在航海方面发展起来,利用六分仪人工观测星体高度角来确定航行体的位置,现在发展为用星体跟踪器测高度角及方位角,推算航行体在地球上的位置及航向。它是利用光学或射电望远镜接收星体发射来的电磁波去跟踪星体,其在空气稀薄的高空和宇宙航行时导航是比较理想的,但在地球附近导航会受到云层及气象条件的限制。天文导航系统是一种自主式导航系统,不需要地面设备支持,不受人工或自然形成的电磁干扰,不向外辐射电磁波,隐蔽性好。

天文导航系统经常与惯性导航系统、多普勒导航系统组成组合导航系统。这种组合导航系统能够获得很高的精度,适用于大型高空远程飞机和战略导弹的导航。当把星体跟踪器固定在惯性平台上并组成天文/惯性导航系统时,可为惯性导航系统的状态提供最优估计和进行补偿,从而使得一个中等精度和低成本的惯性导航系统能够输出高精度的导航参数。

4. 多普勒系统

多普勒(Doppler)导航系统是利用多普勒效应实现无线电导航的机载系统。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。多普勒雷达测得的载体速度信号,与航向姿态系统测得的运载体航向、俯仰、滚转信号一并送入计算机,计算出运载体的地速矢量并对地速进行连续积分等运算,得出运载体的即时位置信息。利用这个位置信息进行航线等计算,即可实现对运载体的引导。多普勒系统的工作原理属于导航方法中的航位推算法。

多普勒系统的工作方式是主动的。其优点是无需地面设备配合工作,不受地区和气候条件的限制,运载体速度和偏流角的测量精度高。缺点是当运载体姿态超过限度时,多普勒雷达因收不到回波而不能工作,定位误差随时间推移而增加。此外,多普勒雷达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. 其他导航仪表

除了上面讲的几大类导航系统外,还有磁罗盘、陀螺罗盘、空速表、计程仪等一般普通导航仪表。虽然这些仪表提供的航向及速度不够精确,但作为导航应急使用往往是十分必要的。

1.3.2 组合导航系统

随着科学技术的发展,目前已出现了多种适用于航行体的导航系统。虽然它们各自都有优点,但也有其固有的不足之处。例如,惯性导航系统具有工作自主性高、抗干扰能力强、输出信息多(位置、速度、航向和姿态等)的优点,但其误差(尤其是位置误差)随时间不断积累;无线电定位系统的定位精度不受使用时间的影 响,但它的输出信息主要是载体位置,对于精确导航来讲,定位精度不够高,且工作范围受地面电台覆盖区域的限制。多普勒导航系统与惯性导航系统一样,同属航位推算系统,它由测得的地速信息推算位置,其导航误差也随时间不断积累。而且,多普勒导航系统必须利用外部航向信息,除非利用惯导系统输出较高精度的航向信号,否则载体上的其他航向设备的航向信号误差一般不能保证小于 $0.5^{\circ} \sim 1^{\circ}$ 。这样,即使不考虑地速测量误差,仅航向误差就将使定位误差大于航程的 $1\% \sim 2\%$ 。20 世纪 70 年代发展起来的 GPS,其特点是定位和测速精度高,具有几十米以内的定位精度和基本上不受时间、地区限制等优点,使得 GPS 在航行体导航系统中属于佼佼者。但是,载体的飞行动作以及难以保证 100% 无故障率的空间卫星结构,会影响 GPS 接收机对 GPS 信号的接收;而且 GPS 接收机输出信号的更新率一般为 $1 \sim 21$ Hz,有时不能满足载体飞行控制对导航信号更新率的要求,致使在航行体上单独使用 GPS 接收机的方案受到限制。

飞行器的发展对于导航系统在精度、可靠性等方面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要求。将载体上安装的几种导航系统组合起来,构成组合导航系统,将能达到取长补短、综合发挥各种导航系统优点的目的,并能提高导航信息精度,更好地满足载体对导航系统的要求。因此,导航技术向着组合导航方向发展是一个必然的趋势。

所谓组合导航,就是用两种或两种以上的非相似导航系统对同一导航信息作测量,并解算形成量测量,然后从这些量测量中计算出各导航系统的误差并校正之。采用组合导航方式的系统就称为组合导航系统,参与组合的各导航系统称为子系统。其中,由于惯性导航系统具有自主性强、隐蔽性好、导航参数全面、输出及时连续、短时间内导航精度高等突出优点,因而一般将惯性导航系统作为组合导航系统的关键子系统。

各类导航系统所提供的导航信息主要是载体位置、速度和姿态。因此,根据各导航系统输出的信息,组合导航系统主要有以下三种组合形式。

(1) 位置组合,就是将两个导航系统各自输出的载体位置信息进行组合,以获得载体的最优导航参数,如惯性导航系统与全球定位系统、惯性导航系统与北斗卫星定位系统、惯性导航系统与合成孔径雷达所构成的组合导航系统。

(2) 速度组合,就是将两个导航系统各自输出的载体速度信息进行组合,以获得载体的最

优导航参数,如惯性导航系统与全球定位系统、惯性导航系统与多普勒导航系统所构成的组合导航系统。

(3)姿态组合,就是将两个导航系统各自输出的载体姿态信息进行组合,以获得载体的最优导航参数,如惯性导航系统与星敏感器、惯性导航系统与磁航向仪所构成的组合导航系统。

其中,某些导航子系统能提供载体位置、速度等多种导航信息,如在全球定位系统与惯性导航系统所构成的组合导航系统中,既有位置组合又有速度组合。不论采用哪种组合方式,经过组合以后的导航系统,充分利用各子系统的导航信息,并对这些信息进行有机处理,形成单个子系统所不具备的功能和精度。而且,由于各子系统能互相取长补短,因而组合导航系统的适用范围进一步扩大。此外,由于各子系统同时测量同一导航参数,测量值较多,从而提高了导航信息的冗余能力,增强了组合导航系统的可靠性和容错性。

当前,人们最关心并得到实际应用的主要是 INS/GPS 组合导航系统、INS/CNS 组合导航系统、地形辅助的 INS 组合导航系统,以及最近发展起来的 INS/SAR 组合导航系统和惯性/北斗组合导航系统等,本书将对这几种常用的组合导航系统进行研究。

1.3.3 导航系统的发展方向

导航系统发展的方向是惯性/多传感器组合导航系统和智能导航专家系统。这些系统具有高精度、高可靠性、高自主性、高动态性能、高抗干扰性能以及故障检测隔离和系统重构等功能。它能根据各个战术阶段、任务目标、威胁环境、各导航传感器信息的可获得程度,动态、智能地选择最好的导航传感器信息源,提供一个容错的融合导航信息来满足航行任务的要求。

当然在军事上,惯性导航系统在任何导航系统都无法代替的,组合导航系统大多都是以惯性导航系统为主。以惯性导航系统为主的组合导航的发展,从比较简单的惯性/多普勒、惯性/大气数据、惯性/天文、惯性/伏尔/测距仪、惯性/塔康等组合方式开始,发展到惯性/地形匹配、惯性/GPS、惯性/图像匹配等组合方式,以及由多种系统组合而成的惯性/卫星/天文、惯性/景象匹配/GPS 等组合导航系统,甚至有什么信息源就利用什么信息源的多传感器组合系统。

这种多传感器惯性组合导航系统的主要优点是:

- (1)以惯性导航系统为主导航系统;
- (2)利用分散估计理论或者联邦滤波器、多模态滤波器进行组合;
- (3)利用数据融合理论融合多传感器的信息;
- (4)实现各子系统间的互补;
- (5)具有容错能力;
- (6)可以设计成多模态、多功能的系统;
- (7)对多个系统可以实现智能化管理。

在这种多传感器惯性组合导航系统中,如何应用专家系统、模糊控制、人工智能、神经网络以及模糊理论等一些新概念、新理论则是需要进一步探索的新课题,有大量的工作要做。从发展趋势来看,这种智能化的多传感器惯性组合导航系统将是下一代导航系统的主要模式。

目前,组合导航系统已成为导航系统发展的主要方向之一,特别是在航空、航天、航海等对导航精度要求较高的领域越来越受到重视。用户可以根据需要,对组合导航提出各种综合性能要求或特殊要求,也可以选择各种不同的组合方案。现代控制系统的成就,特别是最优估计理论的数据处理方法,为组合导航系统提供了理论基础,例如卡尔曼滤波器在组合导航中就取得了卓有成效的应用。

在军事上,对于洲际导弹等战略武器而言,卫星导航与具有自主性的惯性导航及组合导航仍是主要的发展方向。现代战争地面协同作战对导航提出了更多的要求,主要要求导航系统具有强的电子对抗能力、高于敌方的导航信息精度、实时性与易维护性、自主式、高动态、大区域导航的功能。为了地面协同作战的需要,从 20 世纪 70 年代后期开始发展了一些新的导航方式,它们的主要目的是在军事战术使用方面对卫星导航做出有力的补充与扩展,并使己方在导航资源的控制、导航的精度上占据有利地位。

1.4 小 结

本章首先简述了导航系统的发展概况;其次,介绍了导航的基本概念;然后,对无线电导航系统、卫星导航系统、天文导航系统、多普勒雷达系统作了扼要介绍;最后,介绍了组合导航系统及其发展方向。本书是研究组合导航定位技术的一本著作,在本章最后展望了导航系统的发展方向,以供读者在今后研究导航系统时借鉴。

组合导航系统大都是以惯性导航系统作为主系统的,要学习和掌握组合导航定位的知识,就必须了解惯性导航的基本知识。因此,本书将在第 3 章介绍惯性导航的基本知识,以为后面研究各种组合导航系统奠定基础。