



国防特色教材·船舶与海洋工程

船舶导航定位系统

Marine Navigation Systems

赵琳 程建华 赵玉新 编著



YZLI0890107621

HEU 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社
哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社
西北工业大学出版社



国防特色教材·船舶与海洋工程

Marine Navigation Systems

船舶导航定位系统

赵琳 程建华 赵玉新 编著



YZLI0890107621

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书是国防科工委“十一五”国防特色学科专业教材。本书结合国内外最新学术进展和作者从事船舶导航定位技术的研究成果,系统地阐述了国际、国内各种不同类型的船舶导航定位系统。全书共分10章;第1,2章介绍了船舶导航定位系统的发展历史、现状以及导航定位的基础知识;第3章介绍了推算航行系统;第4,5章分别阐述了地文导航系统和天文导航系统;第6章介绍了惯性导航系统;第7,8章分别介绍了陆基无线电导航系统和卫星导航系统;第9章介绍了最新的电子海图系统;第10章介绍了几种现代先进的船舶导航定位系统。

本书是为测控技术与仪器专业的本科生和导航、制导与控制专业的研究生编写的教材,也可作为大专院校教师、工程技术人员从事船舶导航定位技术教学与科研的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

船舶导航定位系统/赵琳,程建华,赵玉新编著. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2010.12

ISBN 978-7-81133-765-5

I. ①船… II. ①赵…②程…③赵… III. ①船舶导航
②船舶定位 IV. ①U675.7②U675.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 257921 号

船舶导航定位系统

赵琳 程建华 赵玉新 编著
薛力 责任编辑

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街124号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

黑龙江省地质测绘印制中心 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:23.5 字数:499千字

2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-81133-765-5 定价:49.00元

前 言

“导航定位”是人类从事政治、经济、军事、文化活动必不可少的信息技术,是航海、航天、航空和武器系统的重要组成部分。纵观人类历史发展,很多科学发现和技术发明是为满足人类导航的需要而产生的,另一方面,人类的许多科学发现和技术发明,如测量学、天文学、无线电技术、计算机技术、卡尔曼滤波技术、卫星技术、微机电技术等等,都率先在导航领域得到应用。

船舶导航定位是一门既古老又年轻的技术,它的历史可以追溯到远古时代,而最新的成就诞生在 21 世纪。近年来,船舶导航定位技术发展十分迅速,结合作者长期从事船舶导航定位技术教学和科研成果,在对 1991 版《船舶导航定位系统》一书部分内容进行修订的基础上,重点针对现代导航技术如惯性导航、卫星导航、电子海图等进行了深入的探讨,特别是融入了船舶导航领域国内外最新进展,介绍了诸如欧洲 Galileo、我国的北斗卫星导航系统、先进的水声导航技术、气象导航技术、无源导航技术等。

本书共分 10 章:第 1 章为绪论,简要叙述了船舶导航定位系统的发展历史和现状、船舶导航系统的类型等;第 2 章介绍了与船舶导航定位技术相关的基础知识,包括地球形状描述、坐标系统、时间系统和海图基础知识;第 3 章介绍了推算航行系统,包括系统组成、推算算法和推算误差分析;第 4 章介绍了地文导航系统的发展简史、定位原理、定位方法和陆标船位误差,并进行了实例设计;第 5 章主要介绍了天文导航系统的发展简史、定位基础、定位原理、定位方法和误差分析,并进行了实例设计;第 6 章介绍了惯性导航系统,包括惯性元件工作原理、陀螺罗经、平台罗经,以及目前较为成熟的平台式惯导系统的定位原理、算法以及提高系统精度的各种校准技术,并简要介绍了捷联式惯导系统的基本知识;第 7 章介绍了陆基无线电导航系统,包括系统构成、测向系统、测距系统和测距差系统的基本原理及系统分析;第 8 章主要介绍了卫星导航系统的基础知识、系统配置以及伪距定位、载波相位定位的基本原理;第 9 章主要介绍了电子海图系统的相关标准、设计原理以及与船用雷达、船舶自动识别系统的集成技术;第 10 章介绍了几种先进的导航定位系统,包括地形匹配导航系统、水声导航系统、气象导航系统和无源导航系统的发展简史、基本原理等有关内容。

本书的第1章、第2章、第8章和第10章无源导航系统中的重力、磁力辅助导航技术由赵琳教授编写;第3章、第6章、第7章和第10章的水声导航系统由程建华副研究员编写;第4章、第5章、第9章和第10章的气象导航、无源导航系统中的地形辅助导航技术由赵玉新副教授编写;全书由赵琳教授规划和统稿。

本书作为国防科工委“十一五”国防特色学科专业教材,为更好地配合“导航、制导与控制”国防特色学科教学,力求做到物理概念清晰、数学分析详尽、前沿跟踪迅速、图形描述细致,使教材内容图文并茂、深入浅出。同时,本书引入了一定程度的双语教材环节,能有效促进学生专业英语词汇量和阅读能力的提高。

在编写和出版过程中,杨功流教授和郝燕玲教授在百忙之中对书稿进行了认真细致的审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议,特此表示感谢。

感谢哈尔滨工程大学出版社薛力同志对本书的热情支持和认真审校。

感谢工业和信息化部对本书出版的大力支持。

由于作者水平有限,不妥和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2010年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导航的历史与发展	2
1.2 导航的分类	7
1.3 发展中的现代导航技术	10
第 2 章 导航定位基础	12
2.1 坐标、方向和距离	12
2.2 坐标系及其转换	27
2.3 时间系统	35
2.4 海图	38
第 3 章 推算航行系统	50
3.1 推算航行系统组成	51
3.2 推算航法计算	60
3.3 推算航行误差	72
第 4 章 地文导航系统	78
4.1 地文导航发展简史	79
4.2 陆标定位原理	80
4.3 陆标船位误差	96
第 5 章 天文导航系统	101
5.1 天文导航发展简史	102
5.2 天文导航基础	103
5.3 天文定位原理	111
5.4 天文定位过程	119
5.5 天文定位误差分析	124
5.6 船用天文导航系统设计实例	133
第 6 章 惯性导航系统	138
6.1 惯性导航系统的核心惯性器件	139
6.2 陀螺罗经系统	143
6.3 平台罗经系统	147

6.4	平台式惯性导航系统	151
6.5	平台式惯导系统校准技术	158
6.6	捷联式惯性导航系统	173
第 7 章	陆基无线电导航系统	186
7.1	无线电导航系统概述	187
7.2	无线电波传播的基础知识	193
7.3	无线电测向系统	201
7.4	双曲线导航系统	206
第 8 章	卫星导航定位系统	227
8.1	概述	228
8.2	卫星定位基础	231
8.3	卫星定位基本方法	242
8.4	差分定位技术和卫星导航增强系统	260
第 9 章	电子海图系统	270
9.1	电子海图技术概述	271
9.2	电子海图数据标准	275
9.3	电子海图系统原理与设计	291
9.4	电子海图与雷达图像叠加导航技术	307
9.5	电子海图与 AIS 集成技术	314
第 10 章	现代先进导航系统	318
10.1	气象导航系统	319
10.2	水声导航系统	323
10.3	无源导航系统	333
附录		349
参考文献		369

第1章 绪 论

The art of finding the way safely and efficiently for vehicles and human beings from one place to another is called navigation. The navigation of rivers, lakes and oceans can go back before recorded history. The word “navigate” comes from the Latin *navis* (meaning “ship”) and *agere* (meaning “to move or conduct”). Until the 20th century, the term referred mainly to guiding ships across the seas. But today, the word also encompasses the guidance of travel on land, in the air, and in inner and outer space.

Typically, ancient mariner remained close to shore and used geographic landmarks to guide them. During day time and clear night, the Sun and stars moving across the cloudless sky gave ancient mariners direction and quarter. The quarters we know today as east and west, the Phoenicians knew as *Asu* (sunrise) and *Ereb* (sunset), which are now recognized by Asia and Europe. The great art of navigation developed by Greeks and Phoenicians remained in use for thousands of years. Also a simplified Dead Reckoning was used by Mediterranean mariners, where the ship's speed was determined by watching seaweed or driftwood, travel time by an hourglass, and heading by guesswork and intuition, until around 1100 AD, when the Chinese created the first magnetized needle compass. Perhaps this is the greatest advance in navigation ever since the third millennium B.C. In 12th and 13th centuries, the European brought several navigational improvements, such as nautical charts, celestial almanacs, astrolabe and cross-staff. And the celestial navigation techniques were greatly improved. Transatlantic expeditions and circumnavigations led by Italian Columbus, Portuguese Magellan and Chinese Zheng He respectively boomed in this period of time.

After a period of relative quiescence, the 20th century brought an unprecedented wave of navigational advances. First of all, the Italian Marconi demonstrated the practicality of worldwide wireless communication by sending a signal across the Atlantic in 1901. In 1907 American Sperry introduced the gyroscopic compass which points to true north. These advances resulted in radio navigation and inertial navigation techniques successively. Especially, a satellite system initiated in 1973 by the United States, called Global Positioning System, has been providing continuous worldwide coverage with precision of 10m approximately. Coming into 21st century, China is joining the leading trend by building its own Compass satellite navigation system.

But the story is far from over. As civilization reaches farther into space, more and more new navigational techniques will be still required. In this chapter, the main story of navigation development is reviewed briefly.

1.1 导航的历史与发展

1.1.1 导航的概念和发展历史

导航,英文叫做 Navigation,源自拉丁文 *Navigare* (*navis* 表示船, *agere* 表示指引),原意为“引导船舶航行”,现代引申为引导包括舰船、飞机、航天器、车辆等在内的运载体以及个人自出发地准确、高效、安全地到达目的地的过程。

导航的历史可以追溯到人类新石器时代晚期。社会文明进步的两大驱动力——商业的利益和征服的欲望,一直是导航技术发展的原动力,导航是人类从事政治、经济和军事活动所必不可少的信息技术。纵观导航的发展历史可以毫不夸张地说,导航发展史就是人类文明发展史的写照。一方面,很多科学发现和技术发明是由于人类导航的需要而产生的;另一方面,大量科学技术的新进展,如数学、地理学、天文学、气象学、海洋学、制图学、无线电技术、计算机技术、卡尔曼滤波技术、卫星技术、微机电技术等等,都率先在导航领域得到成功应用,极大地促进了导航技术的发展。

人类的航海活动始终既深刻反映着又严格地受制于一定历史时期的政治、经济、文化、贸易等状况,航海的历史始终与人类的文明活动紧密联系在一起。导航在历史上可以明显地分为两个阶段,即传统导航阶段和近现代导航阶段。

传统导航阶段(史前—19 世纪末):这个阶段主要是为了满足人类航海的需求。人类活动的主要范围从远古的黄河流域、地中海和波斯湾沿岸、印度河流域逐步向邻近区域扩展,14 世纪末叶新大陆的发现、从欧洲绕过好望角到东方的海上航路的开辟,使得人类活动从凭借陆路、内河、近海交通发展延伸到几乎全世界的海上交通。然而直到 19 世纪中叶,交通运输总的来说还主要依靠人力、畜力和风力,因此导航技术的发展也是较为缓慢的。19 世纪初蒸汽动力在火车和轮船上得到成功应用,海上运输和铁路运输得到了极大的发展。这一阶段的导航技术采用较为粗放的古典导航方式,以传统的陆标定位和天文导航为主,辅之以较为粗糙的推算航法,依赖的最重要的导航信息是航向。其间人类发明的指南针、六分仪、天象仪、计时器等仪器和许多经典导航方法,是人类认识自然环境、探索科学奥秘的重要成就,一直沿用至今。中国人民和世界人民一道,为这些科学技术成就的取得作出了卓越贡献。美国科技史学者罗伯特·坦布尔(Robert K. G. Temple)在《西方受惠于中国》一书的序言中写道:“如果没有从中国引进的船尾舵、指南针和多重桅杆等改进航海和导航的技术,欧洲绝不会有导致地理大发现的航行,哥伦布也不可能远航到美洲,欧洲人也就不可能建立那些殖民帝国”。中国在与海外通过陆上和海上两条“丝绸之路”不断交流的过程中,既出口了大量的瓷器、丝绸,也引进了药物、玻璃、金银器皿等异域珍奇,还包括星历学、医药学、建筑学甚至宗教等文化产品。

近现代导航阶段(20世纪初一至今):19世纪末叶,汽车的大量投入使用使陆路运输进一步繁荣起来,20世纪初航空运输的兴起,大大加快了人类经济和军事活动的节奏。时至今日,人类活动的领域不仅包括了地球表面的七大洲、四大洋、南北两极、陆上、空中,还包括了水下和外层空间,导航需求也扩展至为各式各样的运载器如车辆、舰船、飞机、火箭、卫星、航天器及各种武器提供相应的导航服务。这一阶段导航的功能从主要向载体提供航向信息,转变为主要提供实时、高精度、连续的位置信息,甚至包括载体姿态信息和时间信息。

20世纪初无线电导航技术的发明,使导航系统成为航行中真正可以依赖的工具,具有划时代的历史意义,也标志着近代导航史的开端。这一阶段的两个标志性导航成就是惯性导航技术和卫星导航技术,它们都为导航技术史无前例的革命奠定了基础。当前,集高精度、全天候导航、定位、授时、测速、测姿于一体,导航、测绘和交通技术呈现出极大的融合态势,导航技术已成为名副其实的跨学科、跨行业、广用途、高效益的综合性高新技术,这一趋势将持续深入地发展下去。

1.1.2 传统导航方式

早在大约5 500年以前,地中海地区和古埃及的商人就发现利用船只运送货物是最方便和有效的运输方式,当然他们的航行局限于近海岸或沿着河流进行,导航方法也极为简单,今天我们称之为近岸航行法或引航(Piloting)。据传在公元前2 600年左右,黄帝部落与蚩尤部落在涿鹿发生大战,由于有指南车的指引,黄帝的军队取得了战争的胜利,这种指南车是有记载以来最早指示方向的机械导航装置。

古希腊和与犹太人比邻的地中海沿岸腓尼基人(Phoenicians)为船舶导航作出了重要贡献,他们的许多导航方法沿用至今。例如,腓尼基人可能是最早利用太阳和北极星(Polar Star)进行海上导航的民族,他们驾驶着引以为豪的鸟头鱼尾平底船,出没在东地中海、爱琴海上,发现了欧洲大陆和北非。腓尼基人还用整整三年的时间,利用沿岸地形地貌成功地完成了人类首次环非洲大陆航行,开拓了连接红海与地中海的新航线。古希腊人和腓尼基人还在一些重要沿岸港口点燃篝火,方便往来船舶夜间航行,很显然,这些方法就是我们称之为陆标定位(Terrestrial Fixing)的导航方法。

地中海居民(Mediterranean)很早就掌握了通过船舶航向、航速和航行时间确定位置的方法,就是我们今天所熟知的推算航法(Dead Reckoning)。当然,他们的方法很原始,航向主要靠直觉判断,航速的测量主要利用船上抛出的海草或漂浮的木块(Driftwood),时间的测量则依赖于沙漏(Hourglass)。这样的定位结果虽然不可能精确,但在当时却是一种行之有效的估算方法。这种方法在今天已经演化成为多种导航技术的基础,如惯性导航(Inertial Navigation)等。中国和印度洋区域的居民甚至还利用了相对稳定的季候风确定航向,从而使得一年两次的远航成为可能。

早在公元 27—97 年间,我国就已有关于地磁指南工具的记载。最初的指南针叫做“司南”,它利用磁铁指示地球磁场的特性来指示地理方向,当时仅限于陆地上的应用。随着这项技术的普及和装置的不断完善,公元 1040—1117 年之间中国人率先在世界上使用磁罗盘(Magnetic Compass)进行海上导航。沈括成书于 1085 年的《梦溪笔谈》以及朱彧成书于 1119 年的《萍洲可谈》都对指南浮针的制作和应用作了具体、细致的介绍。到了 12 世纪,指南针经由阿拉伯传到了欧洲,欧洲航海家开始使用类似的磁罗盘,并且绘制了略为精确的海图(Nautical Chart)和天文历书(Celestial Almanacs),重新复制了古希腊人曾经使用过的星盘(Astrolabe)和直角仪(Cross-staff),用于观测天体高度角,从而粗略确定当地纬度。

此前的导航主要依赖的是航向信息,因为只要不出现“南其辕而北其辙”的情况,便终归可以到达目的地。这段时期天文导航技术也有所发展,通过观察太阳、星体和星座的位置变化确定方位,以及根据北极星的高度角确定概略纬度信息。远洋航行的导航方式基本是,在出发之前确定所在港口的纬度(实际上是确定出发地的北极星高度角),然后利用航向信息和其他信息航行至目的地,返航时先在南北方向上航行到与出发港口同纬度(与出发地相同北极星高度角)的位置,然后再沿东或西方向等纬度航行保持北极星高度角不变,回到出发地。在南纬度地区,当北极星不可见时,葡萄牙人发现了太阳的运行规律,采用类似的方法对太阳进行观测,然后作适当的修正,满足确定纬度的要求。

航海技术的不断进步,使得 15—16 世纪成为东西方航海事业蓬勃发展的时期,史称“大航海时代”。1487 年葡萄牙人迪亚士(Bartolomeu Dias)航行到了非洲最南端,命名这个耸立在大西洋中陡峭的大岬角为好望角(Cape of Good Hope)。1492 年意大利航海家哥伦布(Christopher Columbus)发现了美洲大陆,对世界历史和文明的进程产生了深刻的影响。1497 年达·伽马(Vasco da Gama)率船队从里斯本出发绕过好望角抵达印度,葡萄牙借此逐渐控制了印度洋。1499—1500 年,意大利航海家亚美利哥(Amerigo Vespucci)两次登上美洲大陆,证实这片陆地不是哥伦布当年认为的印度岛屿,而是新发现的大陆,故命名为亚美利加洲。1520—1521 年葡萄牙航海家麦哲伦(Ferdinand Magellan)完成了首次环球航行的壮举,大大拓展了欧洲人的地理视野。1569 年地理学家墨卡托(Gerardus Mercator)发明的投影方式成为现代海图绘制的基础。公元 1405—1433 年,中国航海家郑和率领由 200 多艘船只、27 000 多人组成的船队七下西洋,所谓“涉沧溟十万余里,若履通衢”,本着“怀柔远人、和顺万邦、宾服四海”的宗旨,历经 30 多个国家和地区,实现了世界航海史上的创举。他当时采用的导航技术就已经包括航用海图(郑和航海图)、航路指南和航迹推算与修正等地文航海技术以及过洋牵星术等天文航海技术,甚至包括了季风气象导航技术。郑和下西洋不仅在时间上领先了欧洲航海家几十到上百年不等,而且无论在船队规模、航域航程、船只数量及吨位、航海技术等方面,都远远领先于欧洲航海家。

这段时期,四分仪(Quadrant)的应用达到鼎盛,在葡萄牙航海家和探险家之间极为流行,这是一种可以较为精确地测量天体高度的仪器,尽管在摇摆的甲板上使用起来并不方便,而且风浪较大时四分仪的铅锤会偏离重力垂线位置。海图、四分仪、磁罗盘、沙漏计时器以及拖板式

计程仪(Chip Log)等装置和天文、地文、推算等导航方法的成功应用在很大程度上解决了远航时的导航问题,特别是成功解决了纬度测量问题。然而,经度的确定依旧困扰着当时的航海人员。由于地球的自转,很难直接利用观测天体的办法确定经度。英帝国政府甚至在1714年专门成立了经度局(Board of Latitude),悬赏征集经度测量的解决方法,最终英国钟表匠哈里逊(John Harrison)成功发明了一种可以在船上使用的每天误差不超过1s的精密计时器(Chronometer)。这样,如果能够确定船上当地地方时,并精确知道地球上某已知位置(如格林尼治)的时间,那么通过这个时差便可以确定两地的经度差,从而测算出船舶所在经度。

18到19世纪远洋航行、甚至环球航行日益频繁,探索新大陆、建立殖民地、追逐商业利益的欲望日益强烈,对航海技术的探索和发展起到了极大的促进作用。1731年英国数学家、发明家哈得利(John Hadley)和费城的发明家高德弗雷(Thomas Godfrey)先后独立发明了六分仪(Sextant),与15世纪的四分仪相比,这种仪器不仅精度更高,而且更便于在摇摆的甲板上使用,这种设备沿用至今。英国探险家库克(James Cook)在1772—1775年深入南极,越过南纬70度,首次完成自西向东高纬度的环球航行,英国借此获得了澳大利亚的实际统治权。正是在这种背景下,人们对全球统一的时间和地理坐标系的需求极为迫切,1884年英国伦敦格林尼治(Greenwich)天文台所在地被确定为本初子午线(Prime Meridian),在此之前西方各主要国家都有自己的基准子午线和当地时间标准。天文导航在18世纪发明了天文钟之后,解决了天文观测无法求取经度的问题,而法国航海家圣·希勒尔(St. Hilaire)于1875年提出的截距法(Intercept Method)或称为高度差法(Altitude Difference Method)解决了天文船位圆绘图问题,奠定了天文航海的理论基础,并在实践中得到了广泛应用。

1.1.3 近现代导航方式

20世纪是人类导航技术发展突飞猛进的时代。首先无线电导航技术在半个多世纪的时间里从萌芽状态迅猛发展为海、陆、空导航的基本手段。早在1891年无线电报就出现在海洋中航行的船舶上,1902年美国数学家斯通(John Stone)发明了无线电测向技术,1906年装备于美国海军运输船,1912年研制出世界上第一个无线电导航设备,即无线电测向器(Radio Direction Finder),也称无线电罗盘(Radio Compass),并在20世纪30、40年代得到广泛应用。1921年美国建立了第一座无线电导航塔。1935年法国首先在商船上装备了VHF频段的雷达,以观测海岸和附近的船只,用于近岸航行和船间避碰。英国在1937年提出建立低频连续波相位无线电导航系统台卡(Decca),并于1946年投入使用。1942年11月由美国麻省理工学院无线电实验室(Radiation Laboratory)研制的具有四个台站的Loran-A(Long Range Navigation System)系统正式启用,它的改进型Loran-C台链随后于1957年由美国海岸警卫队建成。Loran-C是一种脉冲体制的双曲线型陆基中远程无线电导航系统,1975年被美国政府批准为标准航海导航系统,在航海、航空、陆地以及军事方面都有成功应用。我国在1988年建成了第一个远程无线

电导航系统南海台组,1990年起正式向国内用户开放使用,称作“长河二号”。鉴于所有其他无线电导航系统都达不到全球覆盖的目的,美国政府于1968年还批准研制奥米伽(Omega)甚低频双曲线全球导航系统,并于1971年开始运行,它由分布在全球的八个甚低频地面发射台组成,由于信号工作频率低,因而传播距离远,还可深入水下十几米,既可以为边远地区的远洋作业和飞机越洋飞行提供导航,也可以为潜艇水下位置校正提供信息。其不足之处在于信号传播易受干扰、定位精度和数据更新率较低,1997年9月30日美国政府宣布关闭了奥米伽系统。

其次,在20世纪上半叶惯性导航技术也得到了迅猛发展。惯性导航的理论基础是牛顿力学定律,其发展要追溯到19世纪初。1817年德国测量学的先驱博耐伯格(Frederick von Bohnenberger)研制了世界上第一只陀螺仪。法国科学家傅科(Jean Bernard Léon Foucault)试图利用陀螺的定轴性验证地球的旋转,在1852年发明了可实用的陀螺仪,配上简单的修正装置和阻尼装置后,制成了世界上第一台试验用陀螺罗经,他用希腊文 *gyros* (意即“旋转”)和 *skopein* (意即“观察”)两个词命名了“陀螺仪”(Gyroscope),意思是“用以观测地球旋转的装置”。1890年美国科学家霍普金斯(G. M. Hopkins)演示了第一个电动陀螺仪(Electrically-driven Gyroscope)。德国科学家安修茨(Hermann Anschütz-Kaempfe)在1903年设计了第一个陀螺罗经(Gyrocompass)。他和美国人斯佩里(Elmer Ambrose Sperry)分别于1908年和1911年先后制成了船用陀螺罗经。德国哥廷根大学(Göttingen University)数学家舒勒(Max Schuler)在1923年提出固有振荡周期为84.4分钟的机械装置不受其在地球表面运动加速度的影响,从理论上和技术上完善了罗经的设计和结构,大大提高了导航精度。20世纪20年代起,飞机上先后出现了陀螺地平仪和陀螺方位仪。20世纪40年代中期,由冯·布劳恩(Wernher Von Braun)领导的德国科学家首次在V-2火箭上安装了初级的惯性制导装置,利用陀螺仪稳定火箭的水平和航向姿态,沿火箭纵轴方向安装了陀螺积分加速度计,用以提供火箭入轨的初始速度,这是人类导航定位史上的一次革命。第二次世界大战后,尤其是20世纪50年代中后期,制造工艺和计算机技术得到飞速发展,美国现代惯性制导之父德雷珀(Charles Stark Draper)领导的MIT仪表实验室率先在陀螺精度上取得突破,研制出惯性级的陀螺仪和惯导系统,1953年利用平台式惯导系统首次在B-29轰炸机上成功地进行了横贯北美大陆的试飞,1954年进行了潜艇惯导系统(Submarine Inertial Navigation System)的海上试验。美国海军鸚鵡螺号潜艇(USS NAUTILUS SSN571)装备了北美航空公司机电工程部(Autonetics)研制的N6A(MK1)型惯性导航系统和MK-19型平台罗经,在1957年开始水下探索北冰洋,并在1958年8月3日成功水下穿越北极,历时21天,航程8146海里,定位误差仅为20海里。这一震惊世界的成功,充分显示了惯性导航系统有别于其他导航系统的独特优点:自主性、隐蔽性、信息的完备性,这些特点在军事应用中尤为重要。德雷珀教授1961年开始主持研制具有历史意义的Apollo登月计划的制导系统,在1970年第三次登月途中,Apollo-13服务舱氧气系统爆炸,指令舱的电源遭到破坏,主惯导系统无法正常工作,正是利用该实验室研制的用作备份的捷联式制导系统才得以安全返航。

到了20世纪80年代,随着计算机技术的发展、激光陀螺和光纤陀螺等新型陀螺的出现以及基础加工制造工艺的日益完善,捷联式惯性导航系统应运而生,它省去了复杂的物理实体平台,结构简单、体积小、成本低、维护简单,正在各个领域逐步取代平台式惯性导航系统。

也是在20世纪中期,1957年前苏联首次发射了人造地球卫星Sputnik,之后不久诞生了由约翰·霍普金斯大学应用物理实验室(Applied Physics Lab, John Hopkins Univ)研制的人类第一个卫星导航系统——美国海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System),又称作子午仪(Transit)系统,它预示着经典的导航定位技术面临着一场重大的变革,在导航技术的发展史上具有划时代的意义。该系统于1964年正式建成,共有七颗导航卫星,美国政府1967年批准该系统解密提供民间使用。1973—1996年美国采用扩频通信体制建立了由24颗卫星构成的全球定位系统GPS,它可以提供全球、全天时、全天候的高精度多维连续定位、测速和授时功能,实时定位速度快,是继惯性导航系统成功应用于导航领域后的又一次重大技术突破,被誉为20世纪导航技术史上的又一次革命。在这期间,前苏联—俄罗斯也先后研制了两代卫星导航系统,分别是1965年研制的CICADA系统和1995年正式启用的GLONASS系统,它们在系统配置、定位机理、信号频段、导航精度等方面与美的两代卫星导航系统极为相似。GLONASS的建成和公开化打破了美国对卫星导航独家经营的局面,既可为民间用户提供独立的导航服务,又可与GPS组合提供更好的卫星几何位置。

鉴于卫星导航在军事、民用等各个领域的成功应用和巨大发展潜力,欧洲在2002年正式批准了Galileo卫星导航系统的研制计划,中国也于2002年完成了北斗一号卫星导航系统的建设,投入试运行。卫星导航对人类活动的影响极大,应用价值极高,一经推出便风靡全球,无论是航空、航天、陆地、海洋,还是交通、测绘、农业、旅游,各行各业都有其广阔的应用前景。

1.2 导航的分类

导航的分类方式有很多种。比如,按测量的参数可以分为测距、测角、测距差、测多普勒频移等;按工作区域可以分为全球导航系统、区域导航系统等;按用户是否发射信号可以分为有源系统和无源系统等等。

1.2.1 按定位方法分类

按定位方法的不同,导航系统可以分为两大类,一类是直接定位系统,如天文导航、无线电导航、卫星导航、陆标定位等,这类导航定位系统的定位误差不积累,精度与定位时间无关,但其定位依赖于外部条件,如天文定位需要在良好的天候和气象条件下观测天体,无线电和卫星导航需要能接收到岸台或卫星发射的无线电信号,因此这类导航系统也称为非自主式的导航系统。另一类导航定位系统依赖推算方法来确定载体位置,如由罗经和计程仪构成的推算系

统、惯性导航系统等,称作自主式导航系统。这类系统的最大优点在于不依赖于任何外部信息,因而具有独立自主、安全、隐蔽的特点,非常适合于军事目的的应用,但这类系统的误差是随时间积累的,必须经常进行校正。

1.2.2 按定位原理分类

根据导航的技术机理不同,导航技术可以分为以下类型。

1. 陆标定位(Terrestrial Fixing)

陆标定位,有时也称地文导航,一般是在船舶近海航行时使用的导航方法。陆标是指海上或岸边的明显固定的标志物,如灯塔、山顶、礁石、建筑物等。陆标定位就是根据陆标的位置坐标及其相对载体的距离和方位关系确定船舶位置的方法。因为这些标志物的位置是确定且精确已知的(或可在海图上查找出来),测量出陆标的距离或方位参数,就可以用计算或作图的方法确定船位。

2. 天文导航(Celestial Navigation)

天文导航可能是人类最古老的导航方法之一,它利用光学仪器(如六分仪)人工观测天体(日、月、星等的统称)高度角和方位角,通过计算或作图确定载体的位置。目前已出现利用光学或射电望远镜接收星体发射的电磁波来测量天体高度角和方位角的星体跟踪器。天文导航既可以为航海导航,也可以为航空和航天运载器提供导航服务。甚至,天文导航对宇宙航行也是比较理想的,因为它可以避免航海时受到的天候和气象条件限制。有学者形容天文导航“起源于航海,发展于航空,辉煌于航天”。

3. 推算航法(Dead Reckoning)

根据测量得到的载体速度和航向信息,在已知前一时刻载体位置的情况下,考虑风、流引起的位置偏差影响,解算载体位置的方法,称为推算航法。在船舶导航时还称为船位推算、航迹绘算。推算航法的特点是简单易行,但定位精度较低,误差随时间积累,只能给出载体的概略位置,一般需要通过其他导航方式经常地对其位置进行修正。

4. 无线电导航(Radio Navigation)

无线电导航是利用无线电波在理想均匀媒质中按直线传播,且速度为常数,并在任何两种媒质界面上产生反射的传播规律,测定运动载体位置的导航方法。无线电导航的类型较多,按测量方式可分为测向(测角)、测距、测距离差以及测距测向等;按作用距离可分为:近程 100 ~ 500 km,中程 500 ~ 1 000 km,远程 3 000 km 以内,超远程 10 000 km 以上;按信号发射形式

可分为振幅式、频率式、脉冲式、相位式、混合式无线电导航系统等;按信号发射频率可以分为甚低频、低频、中频、高频、甚高频无线电导航系统等。无线电导航具有测量速度快、精度高、可靠性好的特点,不足之处在于其信号容易受到外界干扰。典型的无线电导航系统包括:(1)伏尔(VHF Omnidirectional Range, VOR);(2)测距器(Distance Measuring Equipment, DME);(3)塔康(Tactical Air Navigation, TACAN);(4)无线电定向机(Radio Direction Finder, RDF);(5)仪表着陆系统(Instrument Landing System, ILS);(6)罗兰系统(Long-range Navigation, LORAN);(7)奥米伽系统(Omega)等。由于以上系统的信号发射台均在陆地,因此也被称为陆基无线电导航系统。

5. 卫星导航(Satellite Navigation)

卫星导航系统通过测定运载体到导航卫星的距离或距离差等参数,并结合获取的或计算得到的导航卫星瞬时位置来确定载体位置。现代卫星导航方法是近代科学技术,如航天技术、天文和地球物理学、精密时间和时间同步技术、扩频通信技术、信号处理技术、计算机和微电子技术、导航定位技术等相结合的产物。从本质上讲,卫星导航系统是无线电导航系统的一种,属于空基无线电导航系统。但由于其独特的定位方式和广泛的应用背景,一般把它从无线电导航系统里单列出来,作为独立分类。根据定位方法的不同,卫星导航可以分为多普勒定位、伪距定位、载波相位定位等多种形式。

6. 惯性导航(Inertial Navigation)

惯性导航系统(简称惯导系统)利用惯性敏感元件(陀螺、加速度计)测量载体相对惯性空间的线运动和角运动参数,在给定的运动初始条件下,根据牛顿运动定律,推算载体的瞬时速度和位置,一般还可获得载体姿态信息。从本质上讲,它属于推算航法。它是一种自主式的导航系统,无需接收或发射任何外部信息即可定位。根据惯性敏感元件在载体上的安装方式不同,惯导系统可以分为平台式惯性导航系统(Platform Inertial Navigation System)和捷联式惯性导航系统(Strapdown Inertial Navigation System)两大类。

7. 雷达导航(Radar navigation)

在船舶上安装的雷达通过对目标发射电磁波并接收回波,可以探索物标并测定物标的距离和方位,据此在海图上标绘出或通过计算求出船位,从而实现定位的目的。从本质上讲,这是陆标定位的一种具体实现方式。除此以外,雷达导航还常用作船舶避碰的手段之一。当船舶在沿岸航行,特别是进入港区、岛礁区、海峡和江河等狭窄水道航行时,地形复杂、危险物多、往来船只频繁,利用自动雷达标绘仪 ARPA(Automatic Radar Plotting Aid)捕获目标、自动跟踪并以矢量形式显示目标的航向和航速,自动以各种方式提醒驾驶员采取避让措施。

在航空的应用上,基于多普勒测速的基本原理,雷达测量出发射电磁波的回波信号多普勒频移,解算出飞机相对于地面的地速和偏流角(即飞机的三维速度分量),采用推算航法求得飞

机的实际位置。从本质上讲,这是推算航法的一种具体实现。随着全天候、高分辨率合成孔径雷达 SAR(Synthetic Aperture Radar)技术的不断成熟,雷达图像目标的匹配定位也必将得到飞速发展和广泛应用。

8. 组合导航(Integrated Navigation)

组合导航,也称为综合导航,是 20 世纪后半叶兴起的提高导航定位精度和可靠性的技术。它以导航计算机为核心,充分利用各导航系统的资源,发挥各导航系统的优势,克服单个导航系统的不足,将装备在载体上的各导航信息有机地组合在一起,通过数字滤波等信号处理技术,为用户提供更加精确、可靠的导航信息。组合导航技术可以克服单一导航设备各自的缺点,扬长避短,使得导航能力、精度、可靠性和自动化程度大大提高。

组合导航系统的产生和发展离不开导航技术和信息融合技术的进步。随着众多的不同原理、不同性能的导航设备的出现,INS/GPS、地形辅助 INS、Loran-C/DR 等一大批组合导航系统相继投入使用。同时,以 Kalman 滤波为代表的信息融合技术进展也十分迅速,特别是为解决集中滤波问题而产生的联邦滤波、为解决非线性问题的粒子滤波等正在受到普遍关注。

1.3 发展中的现代导航技术

进入 21 世纪,导航技术正以前所未有的速度迅猛发展。

在卫星导航领域,美国旨在提升全球定位系统精度、安全性、抗干扰能力和实现军民信用号分离的 GPS 现代化进程正在大力推进当中。欧盟也一直致力于一个雄心勃勃的民用全球导航卫星系统(GNSS)计划,估计到 2020 年全世界将有四大全球导航卫星系统,即现有的美国 GPS 和俄罗斯 GLONASS,欧盟计划在 2013 年建成的伽利略系统(Galileo)和我国正在建设的第二代卫星导航系统(COMPASS),届时天空中将有超过 100 颗导航卫星为各类用户提供导航服务。GNSS 实际上泛指卫星导航系统,包括全球星座、区域星座以及相关的星基增强系统。根据 ICAO 国际民航公约的规定,GNSS 的增强系统共分为三类,即陆基增强系统 GBAS(Ground Based Augmentation System)、星基增强系统 SBAS(Satellite Based Augmentation System)和机载增强系统 ABAS(Aircraft Based Augmentation System)。除了上述的四个全球系统及其增强系统(美国的 WAAS、欧洲的 EGNOS 和俄国的 SDCM)外,其他一些国家也在建设自己的区域系统和增强系统,如日本的 QZSS(准天顶卫星系统)和 MSAS(多功能卫星增强系统),印度的 IRNSS(印度无线电导航卫星系统)和 GAGAN(GPS 与 GEO 静地增强导航),以及尼日利亚运用通信卫星搭载实现的 NICOMSAT-1 星基增强等等。未来的全球导航卫星系统将会呈现多层次增强、多系统兼容、多模化应用以及多手段集成的趋势,形成一个以 GNSS 为主体的应用服务体系,实现全时段、全空间的无缝服务,推动产业的全球化、规模化、规范化和大众化发展。

在惯性导航领域,随着计算机技术、光学陀螺技术、微机电系统(MEMS)技术、甚至纳米机