



普通高等教育“十三五”规划教材

导航概论

卞鸿巍 李 安 王荣颖 马 恒 编著



科学出版社

通高等教育“十三五”规划教材

导航概论

卞鸿巍 李 安 王荣颖 马 恒 编著



科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书主要介绍导航专业知识体系、核心概念、主要原理、导航技术及其军事应用等内容。全书共十二章,分别介绍导航基本概念、导航坐标系、定位导航时间参数、直接定位、直接航姿测量、速度测量、推算导航、时间统一、组合导航等原理、主要导航技术以及综合导航与综合舰桥系统等。通过对导航知识的系统性阐述,便于读者快速理解和掌握导航专业的主要知识。

本书是在海军重点教材《导航概论》的基础上,为了更好地适应读者需求,根据近年来导航技术的最新发展,进一步优化编著而成。本书内容简明清晰,叙述深入浅出,具有较强的系统性,可作为国内导航专业本科学历教育教材,也可作为武器、探测、作战、通信、航海、测绘等相关专业学生以及从事导航相关工作技术人员了解导航专业的自学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

导航概论/卞鸿巍等编著. —北京:科学出版社,2018.7

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-03-058215-7

I. ①导… II. ①卞… III. ①导航-高等学校-教材 IV. ①TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 141311 号

责任编辑:吉正霞 曾 莉/责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2018 年 7 月第 一 版 印张:17 1/4

2018 年 7 月第一次印刷 字数:440 000

定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

导航能力是生物的基本能力。对于人类而言,导航技术决定着人类精确运动感知、路径决策和控制自身和载体运动的能力。由于是人类生存和社会发展的基本需求,导航技术作为人类最古老的科学技术之一,不仅有着悠久的历史,从古至今还有着持续不断、十分活跃的技术发展动力。从近年来人们身边大量出现的移动终端定位服务到国家重大工程北斗卫星导航系统的建设,从民用无人装置的智能驾驶到太空宇宙飞船和深海水下潜器在复杂环境下的高精度定位,导航技术的丰富多样、迅猛发展和巨大影响无处不在。在军事领域,精确制导和导航定位技术对现代战争的影响早已从战术层面上升至影响战争形态的全局。精确的导航、定位和授时(PNT)能力已经成为现代战争中最重要的基础技术保障之一,而基于定位服务(LBS)也已成为当今民用领域活跃的物流运输、仓储管理、消防救援、共享移动等各种室内、户外物联网新产业的核心基础之一。导航能力已经成为国家实力的综合体现,在多个方面深刻地影响着社会生活和军事变革。

正是导航技术有着广泛的应用需求,因而日益受到人们的极大关注。从导航的基本功能来看,为了实现引导载体到达指定时空目标的目的,导航需要解决三个不同层面的问题:第一是确定载体或人自身的运动参数;第二是确定载体或人所处的环境信息;第三是进行航路决策并引导控制到达时空目标。三类技术既相对独立又密切相关,涉及测绘、探测、仪表、控制、通信、水文、气象等多个领域。谈及针对载体的导航,实际上需要综合考虑三个层面才能获得基本的技术体系轮廓。

除了从引导载体运动的角度认识导航外,我们还需要从体系建设角度认识导航。多种导航技术需要大量相应的导航基础设施建设,例如,人们熟悉的北斗、GPS、GLONASS、Galileo等卫星导航,长河二号、塔康等无线电导航以及近年来飞速发展的长、短基线的水声导航系统等,都需要复杂的太空星座、陆地基站、水中信标以及监测、计算和控制体系的支撑。这些独特的专业特点决定了导航的内涵十分丰富,涉及领域极广。同时,不同的学者对于导航的认识界定是多种多样的,技术和装备体系的划分形式也多有不同且各有特色。

如何确定载体的运动参数,即如何确定运动载体的时空基准,是导航的核心问题。这是绝大部分导航专业书籍所关注的焦点。导航技术多样且跨度极广,光电、水声、雷达、通信等多种不同专业都与导航密切相关。根据所采取的技术手段不同,导航技术可以分为惯性导航、无线电导航、卫星导航、水声导航、光学导航以及环境特征匹配导航等。这些导航技术就从属的技术领域而言,彼此之间差异较大。例如,天文导航、视觉导航基于光电技术;回声测深仪、多普勒计程仪以及水声定位系统基于与声呐系统相同的水声技术;导航雷达是雷达技术的应用;卫星导航、无线电导航基于无线通信技术和时统技术等;而惯性导航则涉及精密机械、光学、材料、机电、控制等多种复杂技术。如果再考虑多种基于环境特征的匹配导航、味道导航、组合导航、全源导航等技术方式,涉及的技术领域则更加广泛。

通过多年的教学和工作实践,我们发现,导航具备的鲜明的学科交叉特点给专业发展带来

了广阔的发展空间和创新的勃勃生机,但同时也给专业学习的初学者带来困难。不同层次的学生和从事导航工作的技术人员在专业学习的过程中往往感到导航技术种类繁多、头绪繁杂,难以形成宏观系统的知识体系和专业整体概念。导航专业的学生,更希望在深入某一具体导航技术学习之前,能够建立起导航的整体技术脉络体系。正是这些原因促使我们决定编著本教材,以尽可能地满足上述需求。

这部教材是在海军重点教材《导航概论》的基础上,为了更好地适应读者需求,根据近年来导航技术的最新发展和认识,进一步优化编著而成。全书共 12 章,分为导航基础、导航原理、主要导航技术和舰艇综合导航系统 4 个部分。

第一至第三章为导航基础部分。重点介绍导航的概念和作用、导航坐标系以及定位导航时间(PNT)参数的概念。这一部分是各种导航技术的基础,所以注重基本概念准确性,语言不吝篇幅,尽量深入浅出。

第四至第十章为导航原理部分。从导航参数测算原理的角度,将多种不同的导航系统划分为直接定位、直接航姿测量、速度测量、推算导航、时间统一、组合导航 7 类。强调数学原理的共通性,通过共性和差异的比较,便于读者快捷理解和掌握多种不同导航系统原理,这是教材的主要内容。

第十一章为主要导航技术部分。从专业技术领域的角度,选取无线电导航、水声导航、光学导航以及惯性导航 4 类最为广泛的导航技术,对上述典型导航技术的基础知识、典型装备和特点进行介绍。这一部分主要突出面向多领域多种导航技术的装备技术体系,从广度上体现内容的丰富性和体系性。

第十二章为综合导航系统与综合舰桥。从综合导航系统与综合舰桥介绍舰船导航装备体系。涉及电子海图、组导设备、海洋水文气象装备、自动操舵仪等舰船导航装备。更多侧重舰船导航体系,体现海军导航的特点和使命需求。

总的来说,本教材并不侧重单一导航技术细节,主要强调对原理的理解和知识体系的相对完整,内容组织上注重知识的前后联系和多种视角,并力图把握好广度和深度的关系。本教材可作为国内导航专业本科学历教育教材,还可作为武器、探测、作战、通信、航海、测绘等相关专业学生以及从事导航相关工作技术人员了解导航专业的自学参考用书。

本教材的第 1~3 章由李安教授撰写,第 7、第 9 章由王荣颖讲师撰写,第 6、第 8 章由马恒讲师撰写,卞鸿巍教授撰写其他章节并完成全书的统稿工作。本教材在编写过程中,还得到海军工程大学许江宁、边少峰、陈永冰、朱涛、周岗、吴苗、李豹等多位教员帮助。温朝江、刘文超、戴海发等多位博士研究生在过去五年为本书做了大量资料收集和整理工作。本教材也参考借鉴了近年来国内外导航领域多位著名学者的优秀教材与专著,在此对原海军装备部关劲高工、海军研究院袁书明高工以及所有提供过帮助的同志表示真诚的感谢。

导航技术发展迅猛,领域宽、跨度大。本教材是对建立统一导航知识体系的探索。由于作者水平所限,书中必然存在不足之处,敬请广大读者和同行提出宝贵意见,以便我们不断完善提高,不胜感激。

作者
2018 年 1 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 导航的历史	(1)
一、生物导航	(1)
二、古代导航技术	(2)
三、现代导航技术	(5)
第二节 导航的概念及相关技术领域	(6)
一、导航的概念	(6)
二、导航相关技术领域	(8)
第三节 导航的作用	(11)
一、导航对于航行安全的重要作用	(11)
二、导航对于制导武器的重要作用	(11)
三、导航对武器系统平台的重要作用	(12)
四、导航对网络中心战的重要作用	(12)
第二章 导航坐标系	(14)
第一节 主要坐标系	(14)
一、坐标系的类型	(14)
二、常用导航坐标系	(15)
第二节 坐标系变换	(20)
一、坐标系的表示	(20)
二、坐标系位置参数变换	(21)
三、坐标系间角度关系表示	(22)
四、常用坐标系变换	(25)
第三节 大地坐标系	(28)
一、地球形体数学描述	(28)
二、常用大地坐标系	(30)
第三章 定位导航时间参数	(35)
第一节 定位参数	(35)
一、纬度	(35)
二、经度	(37)
三、高度	(38)
第二节 导航参数	(40)
一、速度	(40)
二、距离	(42)

三、航向方位参数	(43)
四、姿态参数	(45)
五、航行参数	(46)
第三节 时间参数	(47)
一、时间	(47)
二、频率	(51)
第四章 直接定位	(53)
第一节 直接定位基本原理	(53)
一、引例	(53)
二、直接定位通用公式	(54)
三、位置函数	(54)
四、直接定位的特点	(55)
第二节 地文定位原理	(56)
一、基于角度测量的多点定位	(56)
二、基于距离测量的多点定位	(57)
三、三角定位	(58)
四、单点移线定位	(58)
第三节 天文定位原理	(59)
一、天文定位基本原理	(59)
二、基于高度角的位置函数	(60)
三、基于高度差的航海天文定位	(60)
第四节 卫星定位原理	(62)
一、基于距离测量的 GNSS 卫星定位原理	(62)
二、基于距离增量的子午仪卫星定位原理	(65)
三、基于圆锥交汇的铱星卫星定位原理	(67)
第五节 无线电定位原理	(68)
一、基于测距差的双曲线定位系统	(68)
二、单点方位距离定位系统	(70)
三、基于邻近定位的室内无线电定位系统	(70)
第六节 测角与测距方法	(71)
一、测角方法	(71)
二、测距方法	(73)
第五章 基于矢量观测的直接航姿测量	(76)
第一节 矢量测姿原理	(76)
一、双矢量直接定姿原理	(76)
二、多矢量直接定姿原理	(77)
三、直接航姿测量的特点	(78)
第二节 地磁航姿测量原理	(78)

一、地磁测向测姿的基本原理	(79)
二、地磁测向的环境磁场影响	(80)
三、磁罗经	(80)
第三节 天文航姿测量原理	(83)
一、星敏感器测量原理	(83)
二、多矢量天文测姿原理	(84)
三、天文定位原理	(85)
第四节 卫星航姿测量原理	(85)
一、基本情况	(85)
二、载波相位测量原理	(85)
三、卫星导航测姿基本原理	(86)
四、卫星测姿精度分析	(87)
第五节 惯性航姿测量原理	(87)
第六章 基于平台的直接航姿测量	(90)
第一节 惯性稳定平台	(90)
一、陀螺基本特性	(90)
二、陀螺稳定系统的种类	(91)
三、单轴陀螺稳定平台	(92)
第二节 水平仪与陀螺罗经	(93)
一、陀螺地平仪	(94)
二、陀螺罗经	(95)
第三节 平台罗经	(99)
一、三轴稳定平台	(99)
二、工作原理	(101)
三、航姿角度直接测量	(102)
第七章 速度测量	(106)
第一节 主要测速原理	(106)
一、基于运动学原理的速度解算	(106)
二、基于动力系统的速度测量	(108)
三、基于物理效应的速度测量	(108)
第二节 伯努利测速	(109)
一、伯努利水压测速原理	(109)
二、水压式计程仪	(110)
三、空速管	(111)
第三节 法拉第测速	(111)
一、法拉第原理	(111)
二、电磁计程仪	(111)
第四节 多普勒测速	(112)

一、多普勒效应	(112)
二、多普勒计程仪的工作原理	(114)
第五节 声相关测速	(116)
第八章 推算导航	(118)
第一节 推算定位	(119)
一、航迹推算的基本情况	(119)
二、航迹推算的基本方法	(119)
三、航迹推算的特点	(121)
第二节 惯性导航原理	(121)
一、惯性导航的基本原理	(121)
二、平台式惯性导航	(124)
第三节 捷联惯性导航原理	(127)
一、捷联惯性导航的基本情况	(127)
二、捷联惯性导航基本原理	(128)
三、捷联惯性导航系统初始对准	(133)
四、捷联惯性导航系统的特点	(136)
第九章 时间统一	(138)
第一节 时间频率基准	(138)
一、天文钟	(138)
二、石英晶体谐振器	(139)
三、原子钟	(141)
第二节 授时系统	(143)
一、有线直连同步	(143)
二、无线时间同步	(146)
三、时间同步方法比较	(149)
第三节 时间统一系统	(149)
一、守时系统	(150)
二、授时监测发播系统	(150)
三、时频终端设备	(151)
四、时间统一保障系统	(152)
五、时间统一技术的发展	(152)
第十章 组合导航	(155)
第一节 组合导航基本情况	(155)
一、组合导航的概念	(155)
二、组合导航的种类	(156)
第二节 组合导航原理	(158)
一、卡尔曼滤波的基本原理	(159)
二、递推贝叶斯估计基本原理	(161)

三、常用组合导航算法	(163)
第三节 地球物理场	(166)
一、基本情况	(167)
二、地形数据库	(168)
三、重力场基础知识	(169)
四、地磁场基础知识	(174)
第四节 匹配组合导航	(176)
一、匹配定位原理	(176)
二、地形参考导航	(179)
三、重力辅助导航	(183)
四、地磁辅助导航	(185)
第十一章 主要导航技术	(187)
第一节 无线电导航技术	(187)
一、无线电导航基础知识	(187)
二、无线电导航的种类和特点	(193)
三、典型的无线电导航系统	(195)
四、典型的卫星导航系统	(202)
第二节 声学导航技术	(205)
一、水声导航基础知识	(205)
二、水声测深仪系统	(210)
三、水声基线定位系统	(212)
第三节 光学导航技术	(216)
一、天文导航基础知识	(216)
二、舰艇天文导航装备	(219)
三、其他光学导航装置	(220)
第四节 惯性导航技术	(224)
一、惯性元件的基础知识	(224)
二、惯性导航系统	(229)
三、惯性装备体系	(231)
第十二章 综合导航系统与综合舰桥系统	(233)
第一节 舰艇综合导航系统	(233)
一、综合导航系统的概念	(233)
二、舰艇综合导航系统的特点	(233)
三、NAVSSI 舰艇综合导航信息系统结构	(234)
第二节 电子海图	(236)
一、海图投影基础知识	(236)
二、电子海图基础知识	(237)
三、电子海图系统	(238)

第三节 船舶常用组导设备.....	(239)
一、无线电助航设备	(239)
二、航迹自动标绘仪	(242)
三、航行数据记录仪	(242)
第四节 海洋环境测量设备.....	(242)
一、气象导航的基本概念	(243)
二、海洋水文气象要素观测设备	(244)
第五节 自动操舵仪.....	(248)
一、自动舵的基本概念	(248)
二、自动舵的基本原理	(250)
第六节 综合舰桥系统.....	(254)
一、综合舰桥系统的概念	(254)
二、综合舰桥的发展	(255)
参考文献.....	(259)
附录 重要符号列表.....	(262)

第一章 绪 论

在陌生的地方,人们需要知道自己的位置。我在哪里?去哪里?该往哪里走?这些都是导航(navigation)问题。导航技术的发展来源于人类的本能需要,是人类社会的基本需求。

导航是人类最古老的科学技术之一。早在远古时期,人类便需要在丛林、山峦、沙漠和海洋之间穿梭,完成生存所必要的各种活动,必须创造并使用各种古老的导航方法。他们或采取特征明显的山峰和大河作为标志,或标记各种神秘奇异的人工符号作为参照,或利用周而复始运行的日月和有着神话色彩的星斗,或发明地磁罗盘和指南车等古代机械,等等。随着人类的发展、生存空间的拓展以及运输方式的改变,不仅人自身需要导航,人类发明的各种运载体也需要导航。导航技术的发展从古至今都有着持续不断的社会需求发展的原动力。如果人们细心观察,就会发现近年来身边出现了移动终端的测向定位技术、迅速发展的打车软件、手机导航地图以及共享单车定位等各种导航技术的应用服务,就会真切感觉到导航技术的进步不仅决定着人类精确控制自身活动的的能力,而且还深刻影响着人类的社会生活。

随着科学技术的发展和军民领域不断产生的大量需求,导航技术创新层出不穷,发展空间十分广阔。导航渐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。在当今军用技术领域,导航技术业已成为军事指挥(command)、控制(control)、通信(communication)、计算(compute)、情报(intelligence)、监视(surveillance)、侦察(reconnaissance)和杀伤(kill)C⁴ISRK系统重要的组成部分。在舰船、飞机、导弹、宇宙飞行器、战车等运载体上,导航系统都是必不可少的重要设备。

第一节 导航的历史

初接触导航,需要简要了解导航的基本情况。本节从生物导航入手,进而介绍古今中外导航技术的发展历史,以讲解导航技术的梗概和重要作用。

一、生物导航

实际上,与人类相同,绝大部分生物都需要解决导航问题。在漫长的进化过程中,几乎所有动物都进化出必要的导航能力,所以生物大都具有神秘的经过长距离回到原先位置,或者能按照某个规律多次回到同一地点的导航能力。

关于鸟类、哺乳类、鱼类、昆虫等各种动物导航能力的报道非常之多,例如,北极狐可以在数月时间内从太平洋沿岸长途迁徙到大西洋沿岸,这个行程约等同于横跨了加拿大东西侧。有一种叫斑尾塍鹬的滨鸟能够从其繁殖地阿拉斯加飞越近半个地球到达新西兰。还有一种北美黑顶白颊林莺能以极快的速度借助信风,经过100个小时的海上飞行从美国东北部飞至南美过冬。鱼类也具备出色的导航能力。体形修长的欧洲鳗鲡成熟后从生活的欧洲河流顺流而下,经过数千英里(1英里=1.6093公里)直达马尾藻海产卵。鳗鱼幼苗出生后,又重新向欧洲

迁徙。导航能力不仅可以帮助生物完成不可思议的长距离迁徙壮举,也可以帮助生物实现日常捕食活动。例如,美国得克萨斯州的犬吻蝠,能离开洞穴飞行超过 70 公里寻找食物。相对其体形而言,撒哈拉沙漠蚂蚁从其巢穴出去觅食最远可达 500 米。它们能依靠步数计算,并根据阳光的不同照射模式和气味线索,准确地找到回家路径。这种能力对它们十分关键,因为暴露在阳光下时间过长,它们将可能因曝晒而丧命。

为什么生物会具有这些令人惊异的导航能力?人们对生物导航(bionavigation)进行了长期的研究。大量的实例表明,在生物体内有着尚不为人所知的复杂的导航机制。生物导航的方法包括以下几种:一是靠感觉器官综合分析识别路线。许多动物会综合运用多种导航手段,从空气、水流、温度变化、可视标记、气味等多种途径获得有关的环境导航信息,综合判断而不致迷路。例如,夜间迁徙的鸟类,会利用落日余晖判定西向;夜晚通过辨别星空进行导航。信鸽利用太阳作为罗盘确定自己飞往何处;依靠太阳每日的运行规律和体内的生物钟,计算出飞行距离。二是拥有头部独特的地磁感应罗盘。许多动物都拥有人类所没有的地磁感应系统。动物体内的地球磁场感应系统其实只是动物体内庞大、复杂导航系统中的一部分。研究发现,诸如海龟、鲸、某些鸟类、某些鱼类和鼯鼠等动物的头部都有含有磁性物质的特殊细胞,这些磁性物质受磁场的影响会按磁力线的方向排列,并将排列信息传到大脑进行分析和处理,发出控制动物行进方向的指令。三是动物具有可视化地球磁场的视觉感应能力。除依靠磁性细胞感应地磁场外,某些鸟类还能用特有的 X 线视觉系统将磁场可视化。一些鸟类的眼中含有能检测磁场的光感接收器,也许在它们眼中,南方和北方会呈现出不同的色彩。四是通过敏感光的偏振实现定位测向。天空中任何一点偏振光的方向都垂直于由太阳、观察者和这一点所组成的平面。因此,根据天空偏振光的图形,就可以确定太阳的位置。蜜蜂的复眼对偏振光很敏感,能够测出天空中不同方位的亮度,具有特殊的定向功能,即使是乌云蔽日,也能根据太阳的方位变化,进行时间校正。蜣螂等许多夜行动物则能够利用月光来进行导航和定位。所以,生物能够靠山脉、河流、海岸或其他一些可见的路标识别路线,也能够采用嗅觉、磁场、星光等多种方法判断方位。

事实上,导航能力是生物的基本生存能力之一。没有导航能力的生物难以生存。这可以帮助我们比较直观地理解导航能力的重要性。另外,不断地深入研究并揭示生物导航的内在机制,可以帮助人们研究、改进新的导航技术,如偏振光天文罗盘就是从蜜蜂等动物利用偏振光定向的本领中得到启发的。特别是人工智能技术不断发展的今天,生物导航研究的重要性更加凸显,也成为导航技术研究的热点。

二、古代导航技术

现代人类是七万年前智人进化而来的。作为高等生物的人类,导航技术是一种基本需求。所以探索人类导航的历史可以追溯到早期人类历史,导航的方法和技术的悠久也就十分易于理解。实际上,世界各古老文明都有导航技术的记载。在这里主要对中西方古代导航技术的发展以及对于人类历史发展的影响作简单介绍。

(一) 中国古代导航技术

我国对导航技术的研究有着悠久的历史。史书记载,我国最早的导航器械是 4000 多年前

的指南车(southward pointing cart)(图 1-1)。从今天的技术角度来看,指南车是一种方位精度保持的导航装置,也是中国古代机械的代表性发明之一。相传它是由黄帝发明的,黄帝在与蚩尤作战于涿鹿时,遇到大雾,正是采用指南车辨别方向,得以重创蚩尤。从这个传说中还可以看到,作为导航器械的指南车在古时发明之初,就与军事应用密切相连。实际上,这也反映出导航技术的内在军事属性。

4000 多年前的夏朝,我国先民就已经懂得利用天然目标指引航行的地文导航,驶抵预定地点。《尚书·禹贡》篇记载:“……岛夷皮服,夹右碣石入于河。”这指的便是夏朝辽东一带少数民族,泛舟渤海,将碣石山置于右方通过,进入黄河口到中原都城去敬献贡物。史料记载,公元前 4 世纪时,我们的祖先就已经能够在所有周边邻海自由航行。

我国关于指南针(compass)最初的记载见于春秋战国时期。大约在公元前 1 世纪,中国巫师用一个北斗七星形状的磁铁矿做成的勺子,置于光滑的铜天盘上指示北极(图 1-2)。至少在 1500 年前,指南针已用于航海,使人们能够远离海岸涉足大洋。北宋时期的宋括在《梦溪笔谈》中首次描述了磁偏角的发现。到约公元 1090 年,中国的领航员,已采用漂在水上的指南针在阴天指示方向。宣和年间已有记载“舟师识地理,夜则观星,昼则观日,阴晦则观指南针”等各种使用指南针的方法。宋元两代,我国航海事业已十分发达,海上交通极其繁荣。后来指南针传到了阿拉伯和欧洲,对人类有巨大贡献。所以,李约瑟将中世纪中国人发明的磁罗盘称为伟大发明。

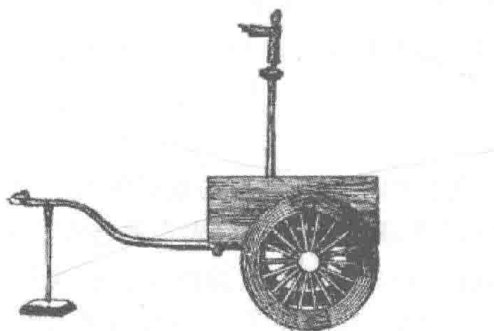


图 1-1 指南车

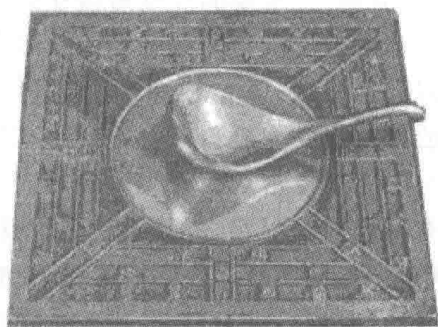


图 1-2 汉代发明的司南

我国是世界上天文学发展最早、贡献最大的国家之一。古代的中国人很早就认识了北极星,也称北辰,并用以辨别方向。早在 2000 多年前,就有船舶载运各种货物漂洋过海,与日本、东南亚等地进行贸易。当时航渡海洋已使用了天文方法。东晋僧人法显在访问印度乘船回国时曾记述:“大海弥漫无边,不识东西,唯望日、月、星宿而进。”到宋代,天文方法导航又有了进一步的发展。元、明时期天文定位技术有很大发展。不过,如果在海上航行只知道南、北方向,而不知道具体位置,仍会迷失航向,难以顺利抵达目的地。随着航海事业的发展,我国创造出一种称为“牵星术”的天文航海导航技术,利用牵星板测定船舶在海中的方位。它是根据牵星板测定的垂向高度和牵绳的长度,换算北极星高度角,近似确定当地地理纬度。

早在公元 13 世纪初,我国已有最早的南海诸岛海图。但流传至今的最早海图是公元 1430 年明朝郑和的航海图(图 1-3)。中国明代著名航海家郑和率船队七下西洋,其采用的航海技术以海洋科学知识和航海图为依据,运用了航海罗盘、计程仪、测深仪等航海仪器,按照海

图、针路簿记载来保证船舶的航行路线,是当时最先进的航海导航技术。根据记载,郑和船队已越过赤道,前后共经过、到达 30 多个国家和地区。白天用 24/48 方位指南针导航,夜间则用天文导航的牵星术观看星斗和水罗盘相结合的方法进行测向。这些综合应用的航海技术使中国古代航海技术领先世界。

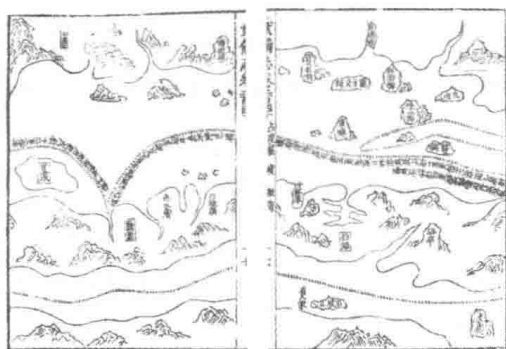


图 1-3 古代中国海图

(二) 西方古近代导航技术

西方古代导航技术的记载最早可以追溯到公元前的腓尼基、希腊时期。他们很早就掌握了通过观测北极星高度角在地中海实现东西等纬度航行的方法。古代的欧洲航海者曾经将“风向”认作“方向”。早期的北欧海盗在欧洲北部的北海和波罗的海水域航行时,更多地利用地文导航。当时的船长十分熟悉海面 and 海中自然物,也会借助如鸟类、鱼类、水流、浮木、海草、水色、冰原反光、云层、风势等各类信息进行导航。公元 9 世纪时,北欧著名航海家弗勒基,甚至通过在船上放出一头渡鸦来引导抵达冰岛。

海图与航海需要密切相关。古埃及、古希腊和阿拉伯人都对海图的发展做出了贡献,提出了一些基本理论和绘制方法,并绘制了相应的早期海图,其中著名的代表人物是古希腊的克罗狄斯·托勒密(公元 90~168 年),他在 1800 多年前的天文测量和大地测量的研究基础上,发表了重要著作《地理学指南》。采用喜帕恰斯所建立的纬度和经度网,把圆周分为 360 等份,每个地点都注明经纬度坐标,并列有欧、亚、非三大洲 8100 处地点位置的一览表,所绘制的 27 幅世界地图和 26 幅局部区域图,统称为《托勒密地图》。公元 13 世纪,随着波特兰海图的出现,海图从地图中分离出来,形成了地图的一个重要独立分支,为航海大发展和地理大发现准备了条件,并促进了文艺复兴,开创了中世纪后期整个地图学复兴的道路。这种海图将海洋作为主要表示对象,而对陆地只表示沿海狭长地区,所有对航海有作用的地物都显著表示,港湾图上保持着目标的正确相互位置和方位,海岸和岛屿轮廓类似于那些相应比例尺的现代海图,在符号和色彩的设计和应用上,具有开创性意义。公元 15~16 世纪,文艺复兴运动催生了地理大发现,为满足航海探险事业的需要,频繁的航海活动要求航海图包含更多内容,覆盖更广区域,具有更高精度和更便于航海使用,墨卡托海图产生了,这是海图学史上继波特兰海图之后的又一个里程碑,并且它一直沿用至今。

地磁导航方面,阿拉伯帝国在其鼎盛时代从中国唐朝学会使用指南针,极大地刺激了阿拉伯航海业的巨大发展。公元 12 世纪,磁针由阿拉伯传入欧洲。公元 1190 年,意大利领航员已开始用一碗水漂起铁针,用磁铁矿或天然磁石使铁针磁化,根据铁针偏转的方向来检查方向估

计是否正确。到约公元1250年,在此基础上磁针已发展成为航海磁罗盘(magnetic compass)。公元14世纪初,意大利人乔亚用纸做成方向刻度盘和磁针连接在一起转动。这是磁罗经发展过程中的一次飞跃。公元16世纪,意大利人卡尔登设计了平衡环,这一框架架构早在汉朝时期已被中国人发明和使用,但卡尔登将其用于控制磁罗经在船舶摇晃中保持水平。随后欧洲人将原始的指南针改制成简单的船用罗经,并绘制出地中海的地图。航海磁罗盘被普遍应用到航海事业上,为进入航海时代的探险船只指引航向,保驾护航。公元18世纪,蒸汽机发明,船舶上出现钢铁,大量钢铁的使用产生强烈的磁场,传统的指南针出现了巨大而且有规律的误差,这一问题的产生,引起了包括法国科学家泊松、英国天文学家爱利、俄国航海家伊夫克鲁兹杰尔等人的关注,他们对航海磁罗盘进行了不断的研究和改进,最终使历史上曾发挥了巨大作用的简易罗盘形成了今天仍在使用的拥有完备的指示、校正、照明、观测系统的磁罗经。

天文导航方面,公元1637年,法国科学家勒内·笛卡儿(Descartes)发表了《几何学》,创立了平面直角坐标系,用坐标描述空间上的点,成功地创立了解析几何,为现代导航定位理论奠定了数学基础。公元1730年,人类发明了航海用六分仪(sextant),并通过对北极星高度的观测测定观测点的纬度。公元1767年,人类发明了天文钟(chronometer),通过与六分仪的结合使用,实现了观测点经度的测定。公元1837年,美国的一位船长发明等高线法,并用它来测定载体位置的经纬度。公元1875年,法国人在前人的基础上提出了高度差法原理,为天文导航奠定了理论和实践的基础。

大约到19世纪中叶,六分仪、天文钟、磁罗经、测深水砣和计程仪等技术已经在航海领域广泛应用,带动了海洋测量、制图技术的发展,世界上大部分海岸线也已经被测量完毕,人类据此绘制了具有航海功能的海图,船舶海上航行安全基本得到了保障。

三、现代导航技术

人类进入20世纪以来,导航领域取得了众多重大的技术突破,出现了惯性导航技术、无线电导航技术、天文导航技术等一系列新型导航系统,在航天、航空、航海和水下探测等多个领域都产生了巨大进步。

惯性导航技术方面。最早出现的惯性导航系统是1908年的用于指向的陀螺罗经(gyrocompass),之后是20世纪20年代研制的陀螺垂直仪等。1942年,德国人发明了V-1火箭、V-2火箭。V-2惯性制导系统被认为是惯性导航系统的雏形。惯性导航系统能在全球范围内和任何介质环境中全天候、自主、隐蔽、连续地进行三维空间定位和定向,因此从其诞生之日起一直受到世界各国的重视。目前,惯性导航系统已扩大到航天和民用航空、航海领域,而且还进一步用于矿藏勘探、石油开采、大地测绘、海洋调查、地震预报、海底救生、海下铺设电缆、海底石油勘探定位等领域。

无线电导航技术方面。无线电导航系统的运作过程实际上就是通过利用无线电信号有效资源,接收、处理并转换成接收点对于该导航台站坐标导航的几何参量,再利用无线电导航信号的电参量特性测量出运动体相对于导航台的方向、距离、距离差等导航参量。它种类繁多,如无线电测向仪、罗兰、台卡、塔康,以及当今人们熟悉的GPS、GLONASS、北斗等卫星导航系统。除此之外,还有许多以无线电技术为基础的常用的导航设备,如导航雷达、气象传真机、AIS系统等。

天文导航技术方面。第二次世界大战前,天文导航是主要的远洋导航手段。几乎所有船舶都配备用于天文导航的各种用表、天文钟和手持式航海六分仪。它们作为普航设备,至今仍在沿用。第二次世界大战后,出现了六分仪与潜望镜相结合的天文导航潜望镜装备。随着技术发展,惯性稳定平台成为天文导航系统的组成部分,为天文导航提供了较高精度的水平基准。天文导航凭借其自身的特点,已广泛应用于航天、航空、航海等多个领域。

水声导航技术方面。最早的水声导航技术可追溯到 1917 年声呐的诞生。1925 年,美国研制成功世界上第一台声学测深仪,从此回声测深法代替了传统的锤测法。声学测速设备主要包括多普勒计程仪(Doppler velocity log, DVL)和声相关计程仪(correlation velocity log, CVL)。水声导航系统还包括水声定位技术和水下地形匹配导航。水声定位系统根据基元间基线长度的不同,可分为长基线系统(long baseline, LBL)、短基线系统(short baseline, SBL)和超短基线系统(ultra short baseline, USBL)。水声导航技术已经成为当前世界各国研究的热点。

除上述导航技术外,基于环境特征的匹配导航、路标导航、视觉导航、味道导航、声音导航、组合导航、全源导航等技术也得到了充分的发展和应用。从导航的发展历程中可以看到,导航技术深刻地影响着社会发展,既是人类的基本需求,也是国家力量的综合体现。同时,导航系统种类多样,技术领域跨度极大,综合性、应用性突出,有着强劲的发展动力。

第二节 导航的概念及相关技术领域

一、导航的概念

导航的概念最初源于航海。对于这一概念,人们普遍的理解是:把载体从一个地方引导到目的地的过程。随着科学技术的发展,各种标志着近代、现代科学技术的众多的运载工具,诸如飞机、导弹、火箭、核潜艇、海洋地球物理资源调查船、巨型油轮、人造卫星、宇宙飞船等的相继出现,大大地扩展了“导航”的概念。现代导航对导航仪器和设备提出了更高的要求。现代导航仪器的用途不再是简单的能保证载体的航行安全,还要能够进一步提供众多的载体基准导航信息,如载体的航行速度、航向、水深信息、航行姿态(纵摇、横摇)、航行时间、位置信息(经度、纬度)等,并进一步实现对舰船的航向、航迹的控制,甚至可以实现舰船的动力定位。

而“把载体从一个地方引导到目的地的过程”的传统定义也和电力技术、网络技术、动力技术、光电技术等技术不同,它描述的是一个过程,一种用途,而不是某一种相对固定的技术形态。实际上,导航对于技术的限定少,只要能够完成上述目的的技术均可以采用。所以导航技术差异很大,存在很多不同的导航技术。传统导航定义更多的是描述和强调这一技术所实现的功能。

那么究竟“导航”概念的内涵是什么?其技术核心要素是什么?近年来,人们开始倾向于将导航技术分为多个不同的层次,在此我们将导航技术按为人类解决的主要问题分为三个不同的种类,即:

- (1) 确定载体自身的运动参数;
- (2) 确定载体所处的物理环境信息;