

卫星定位与导航系列丛书



卫星导航定位与 抗干扰技术

● 陈 军 黄静华 等编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

卫星定位与导航系列丛书

卫星导航定位与抗干扰技术

陈 军 黄静华 安新源 李运宏 刘 睿 孙 吉 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

卫星导航定位在社会生活和军事领域的作用日益显著,从日常的定位到军事的精确制导均离不开导航。随着卫星导航定位技术应用领域和环境的日益复杂化,其抗干扰技术也成为相关研究和应用的焦点。本书重点关注卫星导航定位的基本原理和抗干扰技术,全书内容丰富,全面、系统地介绍了导航定位的概念、卫星导航系统的组成和发展、卫星信号的捕获跟踪技术、卫星导航系统的干扰与抗干扰技术,以及导航和定位在各领域的应用。

本书深入浅出、通俗易懂、理论与实际相结合、实用性强,对于从事导航、导航对抗相关领域的专业人士及科技人员非常有帮助,是一本很值得向有关工程技术人员和高等院校推荐的专业书籍和教学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航定位与抗干扰技术 / 陈军等编著. —北京:电子工业出版社, 2016.6
(卫星定位与导航系列丛书)

ISBN 978-7-121-29150-0

I. ①卫… II. ①陈… III. ①卫星导航—全球定位系统—抗干扰措施 IV. ①TN967.1②P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 140339 号

策划编辑:宋 梅

责任编辑:张 京

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×980 1/16 印张:16.25 字数:346 千字

版 次:2016 年 6 月第 1 版

印 次:2016 年 6 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: mariams@phei.com.cn。

出版说明

对定位和导航的需求伴随着人类文明的发展史,进入 21 世纪以来,人类社会对这种需求却从未像今天这样迫切。定位和导航技术在国防和军事上的重要性不言而喻,同时在民用领域也已经展现了巨大的应用前景和广阔的商业市场,势必在不远的将来改变我们每个人的思维方式和生活习惯。随着现代科学技术的发展,尤其是通信、航天和半导体技术的飞速发展,基于卫星的无线电导航系统已经成为目前主流的定位和导航系统的系统架构。目前,全世界已经投入运行的卫星定位和导航系统有美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS,正在发展的有欧盟的伽利略系统和中国的北斗卫星导航系统。从系统构成的角度分析,基于卫星的定位和导航系统主要由空间卫星网络、地面控制中心和用户终端构成;从技术的角度分析,卫星定位和导航系统包括卫星姿态控制、卫星通信、原子钟技术、控制理论、微电子技术、系统状态参数估计和测绘测量等诸多现代科技分支。总体而言,基于卫星的定位和导航系统是现代科技多分支的有机结合,体现了一个国家的综合技术实力,是当前世界大国和主要利益集团之间竞相发展和竞争的热点科技领域。

在这样的背景下,为了推进祖国卫星定位和导航技术的快速发展,同时共享世界上已经成熟的相关理论和应用,我们携手业界知名专家和相关技术人员,借鉴了在学术界和工业界都已经成熟的卫星定位和导航理论,注重实际经验的总结与提炼,策划出版了这套面向 21 世纪的“卫星定位与导航系列丛书”。本套丛书中除了有国内专家、学者创作的技术专著外,还包括我们精挑细选从国外引进的一些精品图书。丛书的作、译者都是当今站在卫星定位和导航技术前沿的专家、学者及相关技术人员,丛书凝聚了他们在理论研究和实践工作中的大量经验和体会,以及电子工业出版社编辑的心血和汗水。丛书立足于卫星定位和导航系统中所涉及的最新和成熟技术,以实用性、工具性、可读性强为特色,注重读者在实际工作和学习中关心的问题,涵盖了从初学者到具有一定水平的工程技术人员和学术研究人员不同需求,对卫星定位和导航技术的基本概念、多学科的技术细节和实现,以及未来技术展望进行了深入浅出的翔实论述。其宗旨是将卫星定位和导航技术中最实用的知识、最经典的技术应用奉献给业界的广大读者,使读者通过阅读本套丛书得到某种启示,在日常工作中有所借鉴。

本套丛书的读者定位于卫星定位和导航相关产业的工程技术人员、技术管理人员,高等院校相关专业的高年级本科生、研究生,以及所有对卫星定位和导航技术感兴趣的人。

在本套丛书的编辑出版过程中,我们得到了业界许多专家、学者的鼎力相助,丛书的作、译者为之付出了大量的心血,对此,我们表示衷心感谢!同时,也热切欢迎广大读者

对本套丛书提出宝贵意见和建议,或推荐其他优秀的选题(E-mail: mariams@phei.com.cn),以帮助我们在未来的日子里,为广大读者及时推出更多、更好的卫星定位和导航技术类优秀图书。

电子工业出版社

2015 年 12 月

前 言

导航定位应用之广泛超乎人们的想象,导航定位技术产生的效能及在民用和军用中发挥的作用极其显著,导航定位用户群体迅速扩展。尤其是随着导航卫星系统的发展,如 GPS、GLONASS、Galileo 及我国北斗卫星导航系统,导航定位领域经历了重大变革,导航定位技术融入了我们每个人的生活,使我们的生活发生了极大的变化。而在战争越来越表现为体系对抗的今天,导航定位系统成为对手图谋打击的重点目标。导航领域里的控制与反控制、破坏与反破坏的斗争和行动将在现代战争中频繁出现,“导航战”也备受人们的关注,卫星导航干扰及抗干扰问题已成为各国的研究热点。为了使用户和科研人员详细了解定位及抗干扰技术的相关内容,特此编写了《卫星导航定位与抗干扰技术》一书。

本书共由 8 章组成。第 1 章绪论,主要介绍导航定位的概念、发展历史及抗干扰技术的概况。第 2 章全球导航卫星系统,主要介绍 GPS、GLONASS 和 Galileo 卫星导航系统的概况和发展情况。第 3 章专门介绍传统的卫星信号捕获与跟踪技术。第 4 章重点讲解位置、速度和时间(PVT)结果的计算技术,以及与位置计算相关的坐标系和时间系统。第 5 章介绍软件接收机技术,从软件接收机硬件设计、关键模块的软件化设计及关键参数的计算等方面阐述了软件接收机的工程实现方法。第 6 章讨论了卫星导航系统中的干扰技术,包括潜在干扰和人为干扰,最后重点对压制干扰的效果进行分析。第 7 章主要介绍卫星导航系统中的抗干扰技术,包括主要的抗干扰技术及接收机的抗干扰技术,重点讲解了自适应调零天线抗干扰技术、卫星导航/INS 组合导航。第 8 章介绍卫星导航和定位在各个领域的应用。

在本书编写过程中,参考了大量的中外专业文献,也参考了部分相关互联网资料,在此向原作者表示感谢。由于文献较多,部分文献可能因为疏忽而未被列入本书的参考目录,敬请原谅。

本书主要由陈军、黄静华、安新源、李运宏、刘睿、孙吉编写。此外,芦秀伟、李飞、张耀春、王大明、窦赛、商向永、李鹏、崔建勇、黄璞、陈海波、黄晓可、邱超、赵彬等同志在编写和审校过程中做了大量的工作。在此,对他们的辛勤付出表示深深的感谢。

编写本书的作者都是长期从事卫星导航系统研究和研发的专业人士,在查阅了大量资料的基础上,结合实践经验丰富了本书内容。由于导航新技术的不断大量涌现,书中难免有疏漏或不当之处,恳请广大读者和从事导航定位技术研究的专家同行不吝指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导航概述	1
1.1.1 导航的定义	1
1.1.2 导航的作用	1
1.1.3 导航与定位的关系	2
1.2 导航定位技术发展概况	2
1.2.1 导航定位技术的早期起源	2
1.2.2 航海时代的导航	5
1.2.3 导航定位技术的近代发展	8
1.2.4 卫星导航系统的兴起	12
1.2.5 现代卫星导航系统	13
1.3 卫星导航定位系统抗干扰技术概况	15
1.3.1 抗干扰卫星发射技术	16
1.3.2 抗干扰接收技术	16
1.3.3 伪卫星法	18
1.3.4 其他抗干扰技术	18
参考文献	19
第 2 章 全球导航卫星系统	21
2.1 GNSS 频谱分配问题	21
2.1.1 全球频谱分配	21
2.1.2 美国的频率分配	22
2.1.3 欧洲的频率分配	23
2.1.4 频率分配问题的协商	24
2.2 导航卫星系统构成	25
2.2.1 空间部分	25
2.2.2 地面部分	30
2.2.3 用户部分	33
2.3 GNSS 基础参数	35
2.3.1 位置参数	35
2.3.2 信号相关参数	38

2.4 GNSS 现状	40
2.4.1 GPS	40
2.4.2 GLONASS	43
2.4.3 Galileo	46
2.4.4 北斗卫星导航系统	48
2.4.5 各系统的总结和比较	48
参考文献	51
第 3 章 卫星信号的捕获与跟踪	53
3.1 发射部分	53
3.1.1 简介	53
3.1.2 码的结构及生成	55
3.1.3 信号的结构及生成	58
3.2 信号的调整	59
3.2.1 下变频	60
3.2.2 镜像频率	61
3.2.3 采样	62
3.3 接收机结构	67
3.3.1 信号捕获存在的问题	68
3.3.2 提高卫星信号功率电平的方法	71
3.3.3 接收机无线电结构	71
3.3.4 DLL 和 PLL	74
参考文献	79
第 4 章 导航解算技术	81
4.1 地球坐标系及其转换	81
4.1.1 常用坐标系	81
4.1.2 我国坐标系	93
4.2 时间系统	96
4.2.1 世界时系统	96
4.2.2 原子时系统	99
4.2.3 力学时系统	99
4.2.4 协调世界时	100
4.2.5 GPS 时	100
4.2.6 GLONASS 时	101
4.2.7 北斗时	101

4.3	PVT 解的计算	102
4.3.1	三边测量的基本原理	102
4.3.2	坐标系	103
4.3.3	球面交叉法	104
4.3.4	双曲面分析模型	108
4.3.5	与到达角相关的数学计算	110
4.3.6	最小二乘法	112
4.3.7	速度的计算	113
4.3.8	时间的计算	114
4.4	卫星位置计算	115
4.5	误差的量化估计	116
4.6	伪距误差对计算定位的影响	118
4.7	卫星与接收机几何分布的影响 (DOP 的概念)	119
4.8	互用性与完好性	121
4.8.1	互用性	121
4.8.2	完好性	122
4.9	多径对导航解的影响	123
	参考文献	128
第 5 章	软件接收机技术	130
5.1	软件接收机的基本概念	130
5.2	软件接收机硬件设计	131
5.2.1	天线	131
5.2.2	射频增益	131
5.2.3	信号采集	132
5.3	软件接收机设计中关键参数的计算	133
5.3.1	信号传输时间	133
5.3.2	用户位置处的信号强度	133
5.3.3	多普勒频移	134
5.3.4	多普勒频率的平均变化率	136
5.3.5	多普勒频率的最大变化率	136
5.3.6	由于用户加速度而产生的多普勒频率变化速率	136
5.4	软件接收机关键模块软件化	137
5.4.1	GPS 信号捕获模块	137
5.4.2	GPS 信号跟踪模块	145

5.4.3	导航电文获取模块	149
5.4.4	卫星位置计算模块	154
5.4.5	伪距计算模块	161
5.4.6	用户位置计算模块	164
	参考文献	166
第 6 章	卫星导航系统中的干扰技术	168
6.1	卫星导航系统的脆弱性	168
6.1.1	卫星信号发射功率	168
6.1.2	抗干扰容限	169
6.1.3	卫星信号码元和载波	169
6.1.4	其他弱点	169
6.2	潜在干扰	170
6.2.1	潜在干扰概述	170
6.2.2	MSS 对 GPS 接收机的干扰分析	170
6.3	人为干扰	173
6.3.1	干扰技术体制	173
6.3.2	干扰途径	175
6.3.3	对 GPS 接收机的干扰装备	176
6.4	压制干扰效果分析	177
6.4.1	压制干扰对 GPS 信号的影响	177
6.4.2	干扰样式对干扰效果的影响	180
	参考文献	185
第 7 章	卫星导航系统中的抗干扰技术	187
7.1	卫星导航系统抗干扰技术概述	187
7.2	自适应调零天线抗干扰技术	190
7.2.1	自适应调零天线原理	190
7.2.2	自适应调零天线常用的最佳加权系数准则	192
7.2.3	典型自适应调零算法	195
7.3	卫星导航/INS 组合导航抗干扰技术	207
7.3.1	卫星导航/INS 组合导航工作原理	208
7.3.2	卫星导航/INS 组合导航抗干扰能力分析	216
7.3.3	组合导航抗干扰能力仿真分析	220
7.3.4	惯导精度对抗干扰影响分析	222

7.4 GPS 接收机的抗干扰技术	223
7.4.1 射频干扰检测技术	225
7.4.2 前端滤波技术	225
7.4.3 码/载波跟踪环技术	226
7.4.4 窄带干扰处理技术	228
7.4.5 天线抗干扰技术	228
参考文献	229
第 8 章 卫星导航与定位技术的应用	231
8.1 传统应用	231
8.1.1 军用海事应用	231
8.1.2 最初的商业海事应用	232
8.1.3 海事导航	232
8.1.4 时间相关应用	233
8.1.5 测地学	234
8.1.6 土木工程	234
8.1.7 其他陆基应用	235
8.2 个人应用	236
8.2.1 汽车导航(引导和服务)	237
8.2.2 旅行信息系统	238
8.2.3 室内引导应用	238
8.2.4 基于位置的服务	238
8.3 科学应用	241
8.3.1 大气科学	241
8.3.2 构造地质学和地震学	242
8.3.3 自然科学	243
8.4 公共监管应用	243
8.4.1 与完好性有关的应用	243
8.4.2 服刑人员管理	243
参考文献	244

第1章 绪 论

自从有了探索新地域的想法，人类就有了知道自己所处位置及目的地位置的需求。最初，人们只是希望找到回家的路。在地面上做一些特殊“标记”，就能够帮助人们回家。后来，人们开始在海上运输货物，海上航行也成了人们乐于选择的旅行方式。由于在海上没办法做标记，航海家选择沿着海岸线的陆地做标记，而在海岸不可视情况下，就需要寻求其他定位方法，这一需求的变化促进了地理定位技术的发展。

1.1 导 航 概 述

1.1.1 导航的定义

导航是一个技术门类的总称，它最基本的作用是引导载体（如飞机、舰船、车辆、个人）沿着所选定的路线安全、准确、准时地到达目的地。导航的英文为 Navigation，其词源为拉丁语的 navis (boat) 和 agere (guide)，意为“海船移动”、“海船引导”。从其词源可以看出，传统的导航是关于引导船或其他水上运载器从一个地方到另一个地方的技术。现代导航泛指引导陆地、空中、水面、水下、太空等运载器安全、准确地沿所选定的路线、准时地到达目的地的技术。现代导航不仅要解决运动载体移动的目的性，更要解决其运动过程的安全性和有效性。

根据引导的载体不同，导航可以分为航空导航、舰船导航、陆地导航及航天制导等。根据导航手段的不同，又可以分为天文导航、惯性导航、无线电导航和卫星导航等。

1.1.2 导航的作用

导航的基本作用是回答“在哪里？”、“去哪里？”、“如何去？”三个方面的问题。导航的最基本要素就是载体的实时位置（坐标）、运动速度、运动方位（航向）或已运动的距离等。例如，希望一架飞机从一个机场起飞，准确地飞到另一个机场，除了要知道机场的位置坐标外，更重要的是需要实时了解飞机在空中的实时位置、航向和速度。因为只有明确了飞机当前的运动参数，才能借助机上和地面的导航设备或人工目视协同，正确引导飞机飞向目的地。

导航由导航系统完成，导航系统提供的导航信息一般包括：载体的位置信息（经度、

纬度、高程)、航向(方位)、速度、距离、时间、航偏距和航偏角等。

1.1.3 导航与定位的关系

无论是导航还是定位,它们的目都是确定一点的几何位置,其基本技术手段都是借助观测建立未知点(待测点或导航用户点)与已知点间的数学关系,从已知的点位求解未知的点位。这种观测量可以是方向(光学技术),也可以是距离或距离差(距离变化率,如利用无线测距技术);已知点可以是恒星(方向),也可以是地面点(控制点或导航台站);已知点、未知点和观测量之间的数学关系可称为数字模型,通常是建立在几何基础上的数学关系式(方程),通过观测取得一定数量的方程,进而解算未知点的位置。在发展过程中,它们都与观测技术手段密切相关。

导航与定位的工作条件不同、技术要求不同,因而具体技术应用范围和发展也有所不同。一般测量定位要求的定位精度较高(如厘米级甚至更高),导航所要求的精度相对较低。测量定位的点位大多处于静止状态,它一般允许采用多次观测以取得较好的精度,允许事后处理取得定位结果。导航用户点大多处于运动状态,因而它要求实时提供定位结果,一般不能通过多次观测以提高精度。测量定位的作用范围可以较大(如数千千米),也可以较小(如数千米、几十千米)。现代导航还提供测速功能,定位则一般处于零速状态。导航一般作用距离较大,并且要求在时间上提供连续服务,而定位不作要求。总体来讲,两者在时域和空域方面的要求存在差异,也存在不同的发展过程和方式。

1.2 导航定位技术发展概况

1.2.1 导航定位技术的早期起源

最早的导航痕迹可以追溯到公元前 4000 年的新石器时代沉积物和闪族人墓穴。那时,导航没有任何仪器可以借助,只局限于保持海岸线可见,多数探险家极有可能在远离可视海岸线时丢掉自己的性命。

最初,航海者通过白天观察太阳的高度、夜间观察北极星的方位来判断所处的纬度,也就是主要依靠天体来判断方向。这就是早期的天文导航,是通过观测天空中的星体来确定载体位置的导航方法。那时,航海家用一种很简单的仪器来测量天体角度,这种仪器被称为“雅各竿”。观测者使用两根竿子将顶端连接起来,底下一根与地平线平行,上面一根对准某个天体(星星或太阳),就能量出偏角,如图 1.1 所示。然后利用偏角差来计算纬度和航程。天文定位只能给出某点的纬度,这种技术称作“等纬度航行”,测量纬度比较简单,但确定经度非常困难。尽管如此,“等纬度航行”的方法仍在西欧被

普遍地采用,航海者使自己处于与目的地相同的纬度线上,然后保持在这条纬度线上航行,就能到达目的地。不过这并不是非常科学的。即使在今天,利用天文定位误差仍会在 1~2 海里左右。可以想象,当时几乎没有像样儿的航海工具,误差之大也就不言而喻了。随后希腊天文学家喜帕恰斯创造了第一个航海星历表,并建立了第一个著名的星盘(约公元前二世纪),表里载有 1022 颗恒星的位置,后来由托勒密抄传下来。这说明现代导航基本理论在很早之前就有了,随后只是技术方面的改进。例如,当前的全球导航卫星系统利用参考星(人造卫星)和星历表(使接收机能够计算卫星的实际位置),能够进行非常精确的测量。

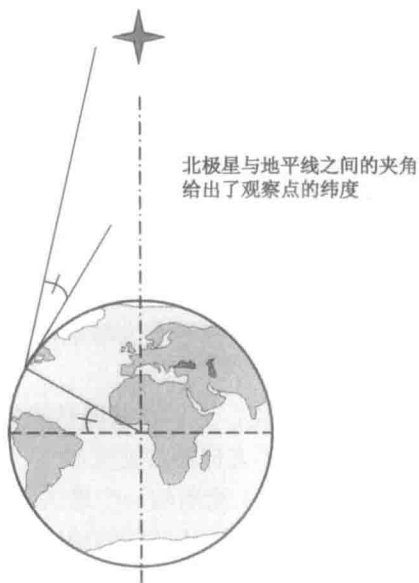


图 1.1 用北极星确定纬度

采用天文学方法通常是不准确的。后来,人们为了进行导航,还考虑到安全因素,海员也采用陆标来确定他们的位置。这些陆地上的陆标和船之间是通视的,可以绘出陆标位置(陆标位置需要已知,就像现在的卫星导航系统需知道卫星位置)和船之间的直线。理论上,绘出三条这样的线就能计算出船的位置,这种技术和目前地形测量学采用的“三角测量法”类似。当然,由于测量误差的存在,这就会形成一个三角形,且通常把三角形内切圆的圆心认为是船的位置。最著名的陆标就是灯塔,还有其他陆标,如自然景观和海上浮标等。世界上最早的灯塔在亚历山大海港,是在公元前三世纪建造的法罗斯岛灯塔。

第一个著名的导航仪器是卡迈勒(见图 1.2),通过测量地平线和已知恒星之间的夹角,分别使用卡迈勒的底部和顶部,就可直接获得观察点的纬度。当然,卡迈勒的精度不能提供足够精确的导航,但进行海岸导航还是没有问题的。如图 1.2 所示,在绳的已

知位置打个结来记录一些具体的位置（如纬度）。

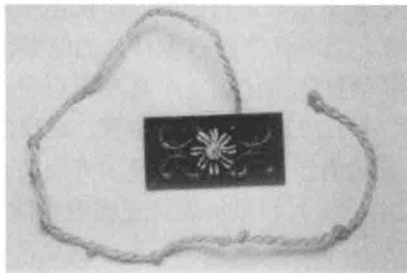


图 1.2 第一个导航仪器——卡迈勒

中世纪，在地中海区域出现了指示绝对方向的仪器，亚历山大·尼卡姆（约 1190 年）首先发明了用于导航的参考磁针。我国利用磁性导航的起源要追溯到公元十世纪。从此之后，指南针的发展没有中断过，开始是一束稻草上别上一个大头针，漂浮在水面上，再安装一个刻度盘用于避免船只运动的影响。值得一提的是，测定磁北和地理北极之间的差异（15 世纪）是指南针发展过程中的一个重要发现。尽管指南针是个创造性的发明，但对于海洋导航来讲是远远不够的。古代导航的主要特征是航迹推测，它依赖于航海家的专业技能，通过星体观测得到的不太精确的纬度或使用航海星历表推算当前的位置。

到了 11 世纪，由于世界地图的出现，人们在获取精确位置方面又前进了一步。最早的航海图（见图 1.3）画出了一组指示方位圈的交叉线（一种特殊的指南针表示法）。例如，伊德里斯（公元 1099 年—1165 年）绘制的一个地图被认为是 12 世纪阿拉伯人智慧的结晶。它包含了从欧洲到印第安及中国，从斯堪的纳维亚到撒哈拉沙漠的详细情况。波尔图是中世纪绘图的主要贡献之一，是现代海上地图的前身，利用这个地图人们可以获悉关于海岸线的信息。16 世纪科西嘉岛的波尔图如图 1.3 所示。

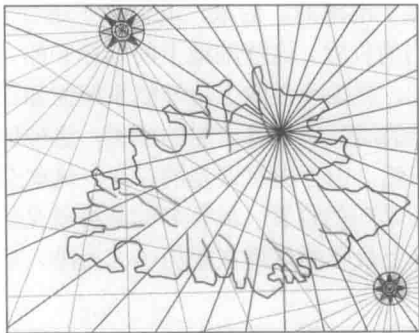


图 1.3 16 世纪科西嘉岛的波尔图

印度洋使用的阿拉伯导航技术利用了恒星方位角的经验方法,适用于在低纬度区域和晴朗天气条件下进行导航。这种使用方位角的方法利用分散在空中的 15 个恒星把地平面分成 32 个部分。

1.2.2 航海时代的导航

15 世纪中期,人们开始寻找与东部印度进行商业活动的路线,为了避开波斯区域,人们开始了航海寻找新航线和新大陆的探险,开启了人类的航海时代。图 1.4 所示的是最著名的航海线路。

这一时期,导航技术仍然采用中世纪末著名的技术,使用的主要方法和工具是航位推算(利用关联精度)、水流的估测和沙漏。导航的进步主要表现在人类技能和培训方面。

郑和下西洋时根据《郑和航海图》(参见明朝人茅元仪所辑《武备志》),结合过洋牵星术(工具为牵星板),白天用指南针导航,夜间则用观看星斗和水罗盘定向的方法保持航向。“牵星术”把天文定位和导航罗盘的应用结合起来,提高了测定船位和航向的精确度。用“牵星板”观测星体的高度来判断船舶位置、方向、确定航线,在当时是最先进的航海技术。

葡萄牙人设立了萨格里什航海学校,西班牙人建立了塞维利亚学校,那里培训了许多著名的船员。克里斯托弗·哥伦布发现了磁偏角和磁偏角的变化,这是他非常重要的贡献。

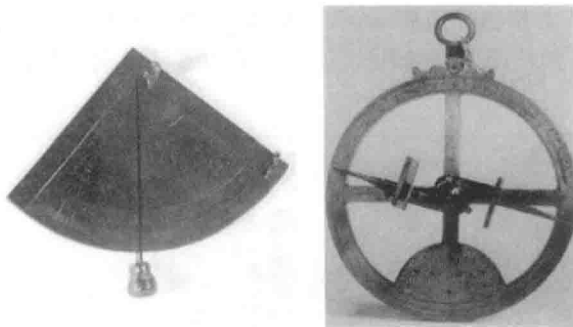


图 1.4 15 世纪著名的航海线路

当时定位技术的精度较低,即使是在陆地上也不能准确地划分领土界线,而且当时只能确定某个位置的纬度,而不能确定经度。因此领土的界线通过一些比较突出的陆地特征(河流、山脉等)来划分,但是对于那些位于几万公里之外的国家来讲,划分边界

也不是一个简单的事情。后来根据伽利略对木星的研究成果，人们能确定陆地经度，但是确定海上经度的问题直到 18 世纪晚期才得到解决。

纬度可以根据地平线上参考星的仰角测量，在海上这是一个很自然的观念。在北半球，自有导航以来，北极星就被作为参考星，但是北极星在南半球是看不到的。葡萄牙人早在 15 世纪中期就遇到了这个问题，他们为了探索非洲附近的南部路线需要寻找一种新的方法，以估计太阳通过远地点的高度，并结合天文表来确定全球的纬度。为了测量两极或太阳高度的角度，需要两个观测对象：地平线和恒星。图 1.5 (a) 所示的是克里斯托弗·哥伦布发明的四分仪，这个安装了铅锤的四分仪能直接读出纬度角。图 1.5 (b) 为星盘，主要用途是确定空中恒星的相对位置，可以进行角度测量。当海水不平静时，星盘的移动部位照准仪比指示仪表读数的铅锤要好得多。四分仪和星盘的主要缺点是很难同时获得地平线和恒星的信息。因此，人们又设计了一个仪器：直角仪（见图 1.6）。它的原理是测量太阳投影的长度。1699 年，艾萨克·牛顿利用两个反射镜（其中一个反射镜可以移动）同时观测到地平线和恒星，解决了显示问题。第一个这样的仪器是八分仪，采用八分之一圆周（ 45° ）。不久就出现了六分仪，采用六分之一圆周（ 60° ）（见图 1.7）。



(a) 四分仪

(b) 星盘

图 1.5 四分仪和星盘

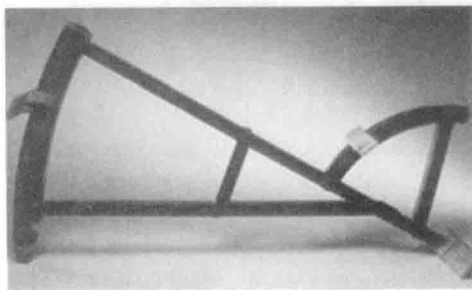


图 1.6 直角仪