

“十三五”国家重点图书

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

海洋测绘丛书

海洋导航与定位技术

赵建虎 张红梅 吴永亭 王爱学 编著
石 波 杨 鲲 田春和 罗孝文 参编

Oceanic
Surveying And Mapping



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

“十三五”国家重点图书
湖北省学术著作出版专项资金资助项目

海洋测绘丛书

海洋导航与定位技术

赵建虎 张红梅 吴永亭 王爱学 编著
石 波 杨 鲲 田春和 罗孝文 参编

Oceanic
Surveying And Mapping

常州大学图书馆
藏书章



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

海洋导航与定位技术/赵建虎等编著;石波等参编. —武汉:武汉大学出版社,2017.9

海洋测绘丛书

“十三五”国家重点图书 湖北省学术著作出版专项资金资助项目
ISBN 978-7-307-19476-2

I. 海… II. ①赵… ②石… III. 航海导航 IV. U675.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 172882 号

责任编辑:王金龙

责任校对:汪欣怡

版式设计:韩闻锦

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:湖北民政印刷厂

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 18.75 字数: 442 千字 插页: 1

版次: 2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-19476-2 定价: 40.00 元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换

学术委员会

主任委员 宁津生

委 员（以姓氏笔画为序）

宁津生 任廷琦 李建成 李朋德 杨元喜 杨宏山
陈永奇 陈俊勇 周成虎 欧吉坤 金翔龙 翟国君

编委会

主 任 任廷琦

副 主 任 李建成 卢秀山 翟国君

委 员（以姓氏笔画为序）

于胜文 王瑞富 冯建国 卢秀山 田 淳 石 波
艾 波 任廷琦 刘焱雄 孙 林 许 军 阳凡林
吴永亭 张汉德 张立华 张安民 张志华 张 杰
李建成 李英成 杨 鲲 陈永奇 周丰年 周兴华
欧阳永忠 罗孝文 胡兴树 赵建虎 党亚民 桑 金
高宗军 曹丛华 章传银 翟国君 暴景阳 薛树强

序

现代科技发展水平，已经具备了大规模开发利用海洋的基本条件；21 世纪，是人类开发和利用海洋的世纪。在《全国海洋经济发展规划》中，全国海洋经济增长目标是：到 2020 年海洋产业增加值占国内生产总值的 20% 以上，并逐步形成 6~8 个海洋主体功能区域板块；未来 10 年，我国将大力培育海洋新兴和高端产业。

我国海洋战略的进程持续深入。为进一步深化中国与东盟以及亚非各国的合作关系，优化外部环境，2013 年 10 月，习近平总书记提出建设“21 世纪海上丝绸之路”。李克强总理在 2014 年政府工作报告中指出，抓紧规划建设“丝绸之路经济带”和“21 世纪海上丝绸之路”；在 2015 年 3 月国务院常务会议上强调，要顺应“互联网+”的发展趋势，促进新一代信息技术与现代制造业、生产性服务业等的融合创新。海洋测绘地理信息技术，将培育海洋地理信息产业新的增长点，作为“互联网+”体系的重要组成部分，正在加速对接“一带一路”，为“一带一路”工程助力。

海洋测绘是提供海岸带、海底地形、海底底质、海面地形、海洋导航、海底地壳等海洋地理环境动态数据的主要手段，是研究、开发和利用海洋的基础性、过程性和保障性工作；是国家海洋经济发展的需要、海洋权益维护的需要、海洋环境保护的需要、海洋防灾减灾的需要、海洋科学研究的需要。

我国是海洋大国，海洋国土面积约 300 万平方千米，大陆海岸线约 1.8 万千米，岛屿 1 万多个；海洋测绘历史欠账很多，未来海洋基础测绘工作任务繁重，对海洋测绘技术有巨大的需求。我国大陆水域辽阔，1 平方千米以上的湖泊有 2700 多个，面积 9 万多平方千米；截至 2008 年年底，全国有 8.6 万个水库；流域面积大于 100 平方千米的河流有 5 万余条，国内河航道通航里程达 12 万千米以上；随着我国地理国情监测工作的全面展开，对于海洋测绘科技的需求日趋显著。

与发达国家相比，我国海洋测绘技术存在一定的不足：(1) 海洋测绘人才培养没有建制，科技研究机构稀少，各类研究人才匮乏；(2) 海洋测绘基础设施比较薄弱，新型测绘技术广泛应用缓慢；(3) 水下定位与导航精度不能满足深海资源开发的需要；(4) 海洋专题制图技术落后；(5) 海洋测绘软硬件装备依赖进口；(6) 海洋测绘标准与检测体系不健全。

特别是海洋测绘科技著作严重缺乏，阻碍了我国海洋测绘科技水平的整体提升，加重了海洋测绘科学研究和工程技术人员在掌握专门系统知识方面的困难，从而延缓了海洋开发进程。海洋测绘科学著作的严重缺乏，对海洋测绘科学水平发展和高层次人才培养进程的影响已形成了恶性循环，改变这种不利现状已到了刻不容缓的地步。

与发达国家相比，我国海洋测绘方面的工作起步较晚；相对于陆地测绘来说，我国海

洋测绘技术比较落后，缺少专业、系统的教育丛书，大多数相关书籍要么缺乏，要么已出版 20 年以上，远不能满足海洋测绘专门技术发展的需要。海洋测绘技术综合性强，它与陆地测绘学密切相关，还与水声学、物理海洋学、导航学、海洋制图、水文学、地质、地球物理、计算机、通信、电子等多学科交叉，学科内涵深厚、外延广阔，必须系统研究、阐述和总结，才能一窥全貌。

就海洋测绘著作的现状和社会需求，山东科技大学联合从事海洋测绘教育、科研和工程技术领域的专家学者，共同编著这套《海洋测绘丛书》。丛书定位为海洋测绘基础性和技术性专业著作，以期作为工程技术参考书、本科生和研究生教学参考书。丛书既有海洋测量基础理论与基础技术，又有海洋工程测量专门技术与方法；从实用性角度出发，丛书还涉及了海岸带测量、海岛礁测量等综合性技术。丛书的研究、编纂和出版，是国内外海洋测绘学科首创，深具学术价值和实用价值。丛书的出版，将提升我国海洋测绘发展水平，提高海洋测绘人才培养能力；为海洋资源利用、规划和监测提供强有力的基础性支撑，将有力促进国家海权掌控技术的发展；具有重大的社会效益和经济效益。

《海洋测绘丛书》学术委员会

2016 年 10 月 1 日

前 言

相对陆地和空中，海洋尤其是水下导航与定位具有可利用资源少、环境复杂、实施相对困难等特点。无源、自主惯性导航系统短时间内具有导航精度高、导航信息较全面等特点，非常适合水下导航，但因系统存在漂移等问题，长时间导航会出现误差积累，且随时间推移，积累量显著增加。随着现代导航、定位及相关技术的发展以及我国“海洋强国”、“一带一路”等战略的全面实施，水下导航与定位在精度、可靠性等方面面临着更高的要求，而单一惯性导航与定位系统难以满足这一需求，需形成一种以惯导系统为主、其他导航系统为辅助的组合导航系统，以提高导航与定位的精度和可靠性。

本书在分析现有导航与定位技术的特点以及水上、水下导航与定位需求的基础上，介绍了导航定位基础、导航定位原理及技术、线性系统及各种估计和滤波等基础理论知识；并重点介绍了惯性导航、卫星导航、水下声学导航、匹配导航等导航定位技术，以及基于上述技术的几种经典的海洋组合导航技术。

全书由9章组成，第1章由赵建虎、张红梅、吴永亭、杨鲲撰写，第2章由赵建虎、吴永亭、王爱学撰写，第3章由赵建虎、王爱学、吴永亭撰写，第4章由王爱学、张红梅撰写，第5章由赵建虎、石波撰写，第6章由王爱学、吴永亭、赵建虎撰写，第7章由吴永亭、赵建虎撰写，第8章由张红梅、赵建虎、杨鲲、王爱学、田春和撰写，第9章由赵建虎、张红梅、石波、吴永亭、杨鲲、田春合、王爱学、罗孝文撰写。

本书的实例数据由天津水运工程科学研究院、国家海洋局第一海洋研究所提供，组合导航技术相关方面的研究工作得到国家863项目的资助，部分书稿内容取材于863项目报告。邹亚靖硕士在水声定位数据处理，王胜平和张凯博士在地磁、地形和地貌匹配导航数据处理及组合导航数据处理等方面开展了工作；硕士邹亚靖、朱世芳、简晓敏、冯杰、尚晓东、胡俊、李治远为书稿的编辑做出了贡献，在此一并表示感谢。

本书可作为海洋测绘或相关专业本科生和研究生教材，也可作为从事海洋测绘或相关工作和研究人员提供参考。

由于涉及内容较多，加之作者知识有限，书中存在不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

作 者

2017年6月于武汉

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 导航技术的发展历史	2
1.3 导航技术的发展趋势	10
第 2 章 导航定位基础	12
2.1 地球椭球及导航要素	12
2.2 导航坐标系统及其相互转换	25
2.3 地图投影	32
2.4 运动载体的状态参量	46
2.5 导航常用的参数量纲	50
第 3 章 导航定位原理及技术	52
3.1 导航定位基本原理	52
3.2 导航定位技术及其特点	65
3.3 导航定位精度	76
3.4 航路规划	79
第 4 章 线性系统及常用估计和滤波方法	92
4.1 线性动力学系统	92
4.2 常用参数估计方法	97
4.3 离散 Kalman 滤波	99
4.4 几种改进的 Kalman 滤波	106
4.5 Kalman 滤波应用	112
第 5 章 惯性导航	115
5.1 发展历史及应用	115
5.2 惯导系统的分类及精度指标	119
5.3 惯导系统组成	120
5.4 平台式惯导系统	129
5.5 捷联式惯导系统	136

5.6	惯性系统的初始对准	143
5.7	惯性导航系统误差	144
第6章	卫星导航与定位	149
6.1	卫星导航定位技术的发展历史	149
6.2	全球导航卫星系统的组成及信号结构	154
6.3	GNSS 定位的误差源	168
6.4	动态绝对定位	170
6.5	局域差分定位	173
6.6	广域差分定位	177
6.7	精密单点定位	180
第7章	水下声学导航与定位	185
7.1	系统组成及导航定位方式	185
7.2	水声导航定位系统及其工作原理	187
7.3	USBL 导航定位	196
7.4	LBL 导航定位	205
7.5	导航定位误差分析	217
第8章	海洋匹配导航	221
8.1	地球重力场和磁场	221
8.2	背景场及匹配要素测量及其数据处理	225
8.3	匹配算法	237
8.4	匹配导航过程	239
8.5	匹配导航实例及分析	242
第9章	水下组合导航	248
9.1	GNSS 与 INS 组合	248
9.2	LBL/USBL 与 INS 组合	255
9.3	地形匹配辅助 INS	258
9.4	地貌图像匹配辅助 INS	267
9.5	地磁匹配辅助 INS	272
9.6	地形匹配、地貌图像匹配、地磁匹配与 INS 组合	277
	参考文献	284

第 1 章 绪 论

1.1 概述

海洋约占整个地球总面积的 71%，蕴藏着极为丰富的资源。随着陆地资源的日益匮乏，人类已将资源开发和利用的重点转向海洋。我国拥有 18000 公里长的海岸线、300 余万平方公里的专属管辖海域以及 6500 多个面积在 500 平方米以上的岛屿，对人均陆地资源占有率不高的我国，海洋资源的开发和利用意义重大(赵建虎，2008)。位置信息是海洋空间信息的重要组成部分，导航与定位是进行海洋军事、海洋科学研究和海洋开发及利用等活动中的一项非常重要的基础性保障工作，具有不可替代的作用。

海洋导航与定位是确定载体(船只或水下潜航器)位置、引导载体从起点到终点的一项技术。海洋定位主要解决载体或目标当前的平面位置和水深问题，可实时或事后确定；导航除了为载体提供位置信息外，还需提供速度、加速度、航向、姿态等状态信息，需实时确定。Leonard 和 Durrant-Whyte 曾将导航的基本功能归纳为以下三个问题的答案：

①我现在在哪里？(Where am I?)

航行器(船只、潜航器)等必须知道自己在什么地方，从而为下一步动作做出相应规划。航行器的当前位置需要根据其外部或者内部环境信息来估计。

②我要去哪里？(Where am I going?)

为完成各种任务，航行器等必须知道它将要去哪里，即目的地。在实际环境中，必须能够识别出周围的物体，并确定它们的状态，进而获得运动的目的地。

③我怎样到那里？(How should I get there?)

一旦知道了航行器在哪里以及将要去哪里，接下来就是如何规划最佳路径或航线，从而有效、准确并安全地到达目的地。

导航是由导航系统完成的，其核心问题是载体的定位和定姿问题，任何导航系统中均包括装在运载体上的导航设备。

导航一般又可分为自主式导航(无源导航)和非自主式导航(有源导航)两类。如果装在载体上的导航设备可以不需要外部设备而单独地产生导航信息，则称为自主式导航系统。反之，除了要有装在运动载体上的导航设备外，还需要其他的外源设备才能产生导航信息，这种系统称为非自主式导航系统。目前自主式导航系统主要有天文导航系统、惯导系统等，非自主式导航系统主要有卫星导航系统在内的无线电导航系统等。就非自主式导航系统而言，还包括装在其他地方的与导航设备配合使用的导航台。根据导航台位置的不同，无线电导航系统又可分为陆基导航系统和空基导航系统两类。陆基导航系统，即导航

台位于陆地，导航台与导航设备间用无线电波联系。空基导航系统，导航台设在人造卫星上，相对陆基无线电导航系统，覆盖范围更大。驾驶员或自动驾驶系统根据导航系统输出的导航信息，可在空中、陆地和海洋任何位置对航行器进行控制、制导，使其正确地向目的地前进。

海洋位置服务在军事和民用方面均有着很大的需求和应用前景。水面船只和水下潜航器一直是海洋航运、科学研究、资源调查和开发等海洋活动的重要支撑载体。自 20 世纪 70 年代到 21 世纪初期，随着海洋军事、经济以及科学研究活动的日益加强，人们对水上和水下载体导航与定位在精度和可靠性方面的要求变得越来越高。经过长期发展，目前在水面已形成了卫星导航定位技术与惯性导航技术相结合的组合导航技术，在水下形成了由长基线、超短基线声学定位系统与惯导系统组合的导航定位系统，实现了水上和水下的立体导航与定位。不同于陆地，由于海洋环境的特殊性，在海洋中实现精确、可靠的导航和定位相对困难，海洋导航与定位已成为导航界关注的热点问题之一。

海洋导航定位具有工作时间长、环境复杂、信息源少等特点，采用单一导航定位技术，其精度和可靠性均难以满足要求，一种有效的途径是采用组合导航技术，即将两种或两种以上的非相似导航系统有机地组合在一起，实现系统或观测要素信息的融合，不仅可以实现系统及信息间的取长补短、提高导航的精度，而且可以适当地降低对单一导航系统器件的精度要求以及成本，提高系统的可靠性和容错性。

实现组合导航的基本方法有两种，其一是回路反馈法，即采用经典的回路控制法，抑制系统误差，并使各子系统间实现性能上的互补；其二是最优估计法，即采用 Kalman 滤波或者维纳滤波，从概率统计最优角度估计出系统误差并消除。两种方法均可实现各子系统信息的互相渗透，有机融合，从而起到性能互补的功效。由于各子系统的误差源和量测误差均为随机误差，以状态空间分析法为基础、Kalman 滤波为代表的最优估计法远优于第一种方法，其应用最为广泛，也最为典型。因此，在组合导航系统的设计和应用中，一般都采用 Kalman 滤波。

组合导航技术随着计算机技术、电子信息技术以及现代控制理论的发展而进步，并率先在航空、航天与航海等领域得到了广泛应用，是 21 世纪导航技术发展的主要方向之一，也是未来导航技术应用的主要模式。

1.2 导航技术的发展历史

导航历史悠久。早在定居文明出现之前，游猎时代的人类就经常要在迁徙中寻路，并因此认识了位置不变的北极星，认识到靠南的一面树枝比较茂密。自从人类出现最初的政治、经济和军事活动以来，便有对导航的需求。远古时期的人类在狩猎或寻找猎物时，在夜晚行进中需要依靠星空辨别方向，因此出现了天文学，天文导航也成为人类最早的导航系统之一。天文导航也是古丝绸之路上的导航系统。当人类的经济与军事活动还较为简单时，因为只要在行进方向上不出现错误，便可以到达目的地，因此人类主要依赖的、同时也是最为需要的导航信息就是方向。随着人类运输和交通工具的不断改进，为了提高安全性和经济性，天空被划分为具有一定高度和宽度的航路，近海和港口被划分为不同的航

道，人们对导航的要求也从航向转变为对未知的准确判断与预测，使导航的功能从主要提供载体的航向变为主要提供载体的位置信息及速度信息。尤其是军事领域的需要，出于自身安全和有效打击敌方的目的，对运载体的位置和速度信息的精确确定要求越来越高，现代科技的发展为这些提供了必需的基础，无线电导航和惯性导航在此背景下出现并不断发展。无线电导航的发明，使导航系统成为航行中真正可以依赖的工具，具有划时代的意义。

下面首先根据导航技术方法应用的年代将导航的发展分为四个阶段进行简要介绍，然后介绍航海导航的发展简史。

1.2.1 导航发展阶段

根据导航技术出现及应用的年代，可将其大致分为四个阶段：早期导航阶段、普通导航阶段、近代导航阶段和现代导航阶段。

1. 早期导航阶段

早期导航阶段为 19 世纪中叶以前，以指南车、指南针和天文导航为主要代表。

(1) 指南车

人类历史上研制最早的导航设备是四千年前黄帝部落使用的指南车。指南车利用机械装置实现定向性(如图 1-1 所示)，其发明标志着我国古代对齿轮系统的应用在当时居于世界遥遥领先的地位。

指南车是现代车辆上离合器的先驱，但两者的原理和构造完全不同，指南车实际上要比指南针更早。传说中黄帝部落和蚩尤部落在公元前 2600 年发生的涿鹿之战中，黄帝部落使用了指南车。指南车使得黄帝的军队在大风雨中仍能辨别方向，从而取得了战争胜利。这是人类研制的导航设备在战争中显示出的巨大作用。

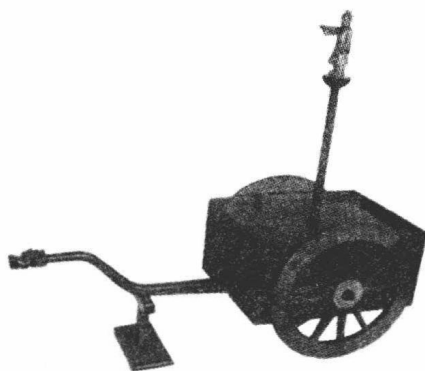


图 1-1 指南车

(2) 司南

早在春秋战国时期，我们祖先就了解并利用磁石的指极性制成最早的指南针——司南。战国时的《韩非子》中提到用磁石制成的司南。司南就是指南的意思。东汉思想家王

充《论衡》中也有关于司南的记载。司南由一把“勺子”和一个“地盘”两部分组成。司南勺由整块磁石制成。它的磁南极一头做成长柄，圆圆的底部是其重心，十分光滑。地盘是个铜质的方盘，中央有个光滑的圆槽，四周刻着格线和表示 24 个方位的文字。如图 1-2 所示。

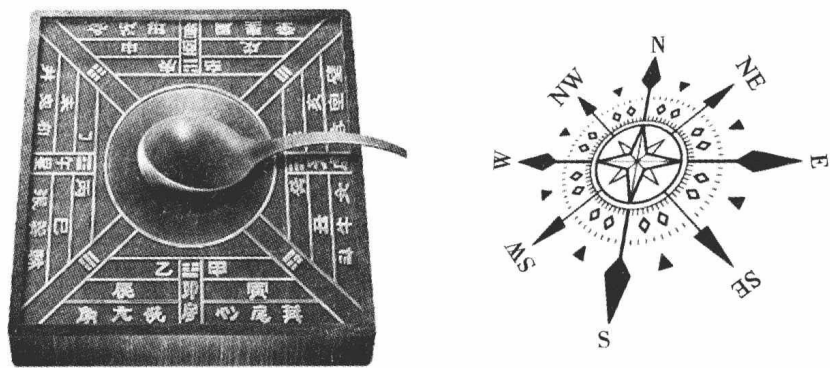


图 1-2 司南

由于司南底部和地盘圆槽都十分光滑，司南放进地盘就能灵活转动，在静止下来的时候，磁石的指极性使长柄总是指向南方，这种仪器就是指南针的前身。由于当初使用司南必须配上地盘，所以后来指南针也叫罗盘针。在制作中，天然磁石因受热容易失去磁性，故司南不能广泛流传。到宋朝时，有人发现了人造磁铁。钢铁在磁石上磨过，带有磁性，而且磁性比较稳固不会丢失。后来在长期实践中出现了指南鱼。从指南鱼再加以改进，把带磁的薄片改成带磁的钢针，就创造了比指南鱼更进一步的新指南仪器。把一支缝纫用的小钢针，在天然磁石上磨过，使它带有磁性，人造磁体的指南针就产生了。

指南针发明后很快应用于航海。最早记载指南针用于航海导航的文献是北宋宣和年间（1119—1125 年）朱彧所著《萍洲可谈》（成书晚于《梦溪笔谈》）。朱彧之父朱服于 1101—1102 年在广州任高级官员，他随父亲在广州住过很长一段时间。该书记录了他在广州的见闻。当时广州是我国和海外通商的大港口，有管理海船的市舶司，有供海外商人居留的住所，航海事业很发达。

《萍洲可谈》记录了广州蕃坊和市舶司的很多情况，记载了很多有经验的水手。他们善于分辨海上方向：“舟师识地理，夜则观星，昼则观日，阴晦则观指南针。”识地理，表明当时舟师掌握海上确定海船位置的方法，说明我国人民在航海中已经知道使用指南针。这是全世界航海史上使用指南针的最早记载，我国人民首创的这种仪器导航方法，是航海技术的重大革新。

中国使用指南针导航不久，就被阿拉伯海船学习使用，并经阿拉伯人传至欧洲。中国人首先将指南针应用于航海，比欧洲人早至少 80 年。北宋沈括在制作和应用指南针的科学实践中发现了磁偏角的存在，并指出这是由于磁极不正好在南北两极的缘故。指南针及磁偏角理论在远洋航行中发挥了巨大作用，使得人们获得了全天候航行的能力，人类第一次在大海中获得了自由，从而开辟了许多新航线，缩短了航程，加速了航运发展，促进了

各国人民的文化与贸易交流。指南针对于航海事业意义重大，李约瑟说：“你们的祖先在航海方面要比我们祖先先进。中国远在欧洲之前懂得用前后帆的系统御风而行，或许由于这个原因，中国航海史上没有出现过多桨奴隶船。”

(3) 天文导航

在大海中航行，没有导航定位是不行的。为确定船的位置，人们利用星体在一定时间与地球的地理位置具有固定规律的原理，发展了通过观测星体确定船的位置的方法——天文导航。

中国古籍中有许多将天文应用于航海的记载。《淮南子》说：夫乘舟而惑者，不知东西，见斗极则悟矣。《抱朴子外篇》说：夫群迷乎云梦者，必须指南以知道；并乎沧海者，必仰辰以得反。东晋僧人法显从印度返回中国，见海上“不知东西，只有观看太阳、月亮和星辰而进”。宋朝之前，航海中都是夜间看星星，白天看太阳，北宋时才开始在阴天看指南针。

元明时期，已经可以通过观测星的高度来定地理纬度。这是我国古代航海天文学的蒿矢，称为“牵星术”。在明代时，航海知识积累和应用达到鼎盛，此时出现了郑和下西洋。他和船队在航海过程中，仅靠星辰和指南针是不够的，而是采用了“过洋牵星”的技术，即用牵星板测量所在地的星辰高度，然后计算该地地理纬度，以此测定船只的具体航向。这种技术使中国当时的天文导航技术达到相当高的水平，代表了 15 世纪初天文导航的世界水平。

欧洲在 15 世纪之前只能在白昼顺风沿岸航行。15 世纪出现了用北极星高度或太阳中天高度求纬度的方法，当时只能先南后北到达目的地的纬度，再东西向到达目的地。16 世纪虽然有观测月距(月星之间角距)求经度法，但不够准确，而且解算繁琐。18 世纪出现了六分仪和天文钟(见图 1-3)，前者用于观测天体高度，大大提高了准确性；后者可以在海上用时间法求经度。1837 年，美国船长 T. H. 萨姆纳发现天文船位线，从此可以在海上同时测定船体经纬度，奠定了近代天文定位的基础。1875 年，法国海军军官圣依莱尔发明截距法，简化了天文定位线测定作业，至今仍在使用。

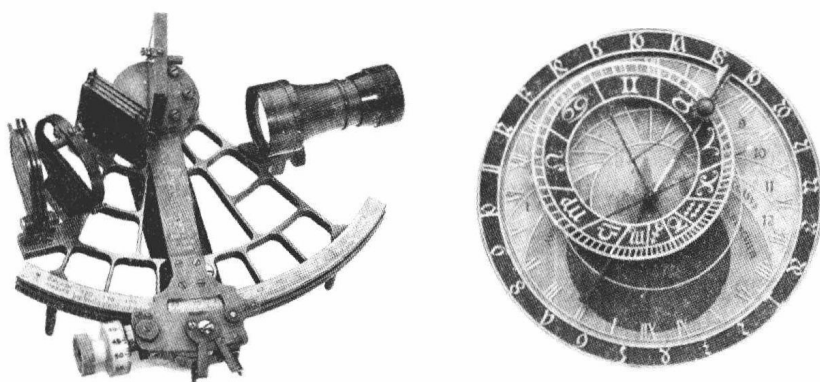


图 1-3 六分仪和天文钟

2. 普通导航阶段

时间为 19 世纪中叶到 20 世纪 30 年代末，以惯性导航为代表。

自 1687 年牛顿三定律提出以来，为惯性导航奠定了基础。1852 年，傅科提出陀螺的定义、原理和应用设想。1908 年由安修茨研制出第一台摆式陀螺罗经(见图 1-4)。1910 年舒勒提出“舒拉摆”理论。上述这些理论和技术是惯性导航发展的基础。

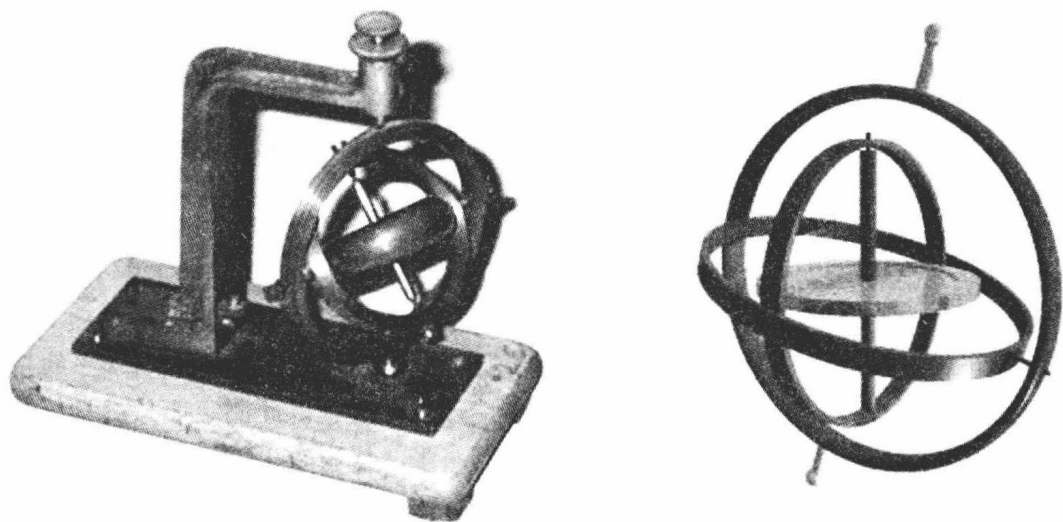


图 1-4 陀螺仪

惯导技术开始应用于 20 世纪 40 年代火箭发展初期。首先是惯性技术在德国 VI-II 火箭上的第一次成功应用。到 50 年代中后期，0.5 海里/h 的单自由度液浮陀螺平台惯导系统研制并应用成功。1968 年，漂移约为 0.005°/h 的 G6B4 型动压陀螺研制成功。这一时期，还出现了另一种惯性传感器——加速度计。技术理论研究方面，为减少陀螺仪表支撑摩擦与干扰，挠性、液浮、气浮、磁悬浮和静电等支承悬浮技术被逐步采用；1960 年激光技术的出现为后续激光陀螺(RLG)发展提供了理论支持；捷联惯性导航(SINS)理论研究趋于完善。

20 世纪 70 年代初期，第三代惯性技术发展阶段出现了一些新型陀螺、加速度计和相应的惯性导航系统(INS)，目标是进一步提高 INS 的性能，并通过多种技术途径来推广和应用惯性技术。这一阶段的主要陀螺包括：静电陀螺、动力调谐陀螺、环形激光陀螺、干涉光纤陀螺。除此之外，超导体陀螺、粒子陀螺、固态陀螺等基于不同物理原理的陀螺仪表相继设计成功。20 世纪 80 年代，伴随着半导体工艺的成熟，采用微机械结构和控制电路工艺制造的微电机系统(MEMS)开始出现。

当前，惯性技术正朝着高精度、高可靠性、低成本、小型化、数字化的方向发展，应用领域更加广泛。一方面，陀螺的精度不断提高；另一方面，随着环形激光陀螺、光纤陀螺 MEMS 等新型固态陀螺仪的逐渐成熟以及高速大容量数值计算机技术的进步，SINS 在低成本、短期中等精度惯性导航中呈现取代平台式系统的趋势。惯性导航已经成为一种最

为重要的无源导航技术。

3. 近代导航阶段

时间为 20 世纪 40 年代至 20 世纪 60 年代前后。

19 世纪电磁波的发现，直接推动了近代无线电导航系统的发展。20 世纪二三十年代，无线电测向是航海和航空主要的一种导航手段，而且一直沿用至今。不过，后来变成一种辅助手段。第二次世界大战中出现了双曲线导航系统，雷达也开始在舰船和飞机上用作导航手段，如雷达信标、敌我识别器和询问应答式测距系统等。远程测向系统也在这一时期出现。飞机着陆开始使用雷达手段和仪表着陆系统。40 年代后期，伏尔导航系统研制成功。50 年代出现塔康导航系统、地美导航系统、多普勒导航雷达和罗兰 C 导航系统(见图 1-5)等。与天文导航相比，无论在定位的速度还是自动化程度方面都有了长足进步。但是无线电导航定位系统的作用距离(覆盖)和定位精度之间产生矛盾(作用距离长，定位精度低；作用距离短，定位精度高)。

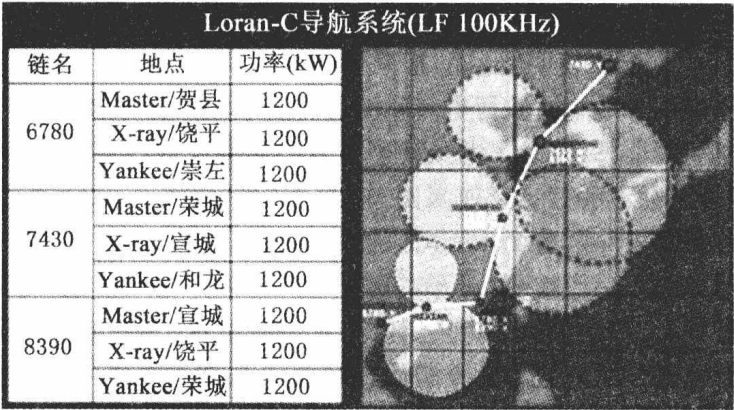


图 1-5 早期我国部分海域的 Loran C 系统参数及覆盖范围

4. 现代导航阶段

时间为 20 世纪中叶至今。以卫星导航为标志，同时向多手段融合集成方向发展。

随着 1957 年苏联第一颗人造地球卫星的发射和 20 世纪 60 年代空间技术的发展，各种人造卫星相继升空，人们很自然想到如果从卫星上发射无线电信号，组成一个卫星导航系统，就能很好地解决覆盖面和定位精度之间的矛盾，于是出现了卫星导航系统(星基无线电导航系统)。约翰霍普金斯大学应用物理实验室研究人员通过观测卫星发现，接收频率或发射频率存在多普勒频移现象。这样，知道用户机位置，测得多普勒频移，便可以得到卫星位置；反过来，知道卫星位置和多普勒频移，便可得到用户机位置。

最早的卫星定位系统是美国的子午仪系统(Transit)，1958 年开始研制，1964 年正式使用。由于系统卫星数目较少(5~6 颗)，运行高度较低(平均 1000km)，从地面站观测到卫星的时间间隔较长(平均 1.5h)，因而无法提供连续的实时三维导航，而且精度较低。为满足军事和民用对连续实时和三维导航的需求，1973 年美国国防部制定了 GPS 计划，并于 1993 年全面建成。目前常见的卫星导航定位系统有美国的 GPS 系统、俄罗斯的格洛

纳斯(GLONASS)系统、欧洲的伽利略(GALILEO)系统以及我国的北斗(BDS)系统。

1.2.2 航海导航发展历程

从15世纪末开始,欧洲人沿着海洋向全球不断扩张,其基本前提之一,就是航海导航技术的不断发展。

1. 从地中海到大西洋

地中海是欧洲文明的摇篮,也是欧洲航海文化的摇篮。欧洲人的航海知识与航海技术,主要发源于地中海地区。自古代至中世纪,人们在地中海上航行时,都是沿着海岸线进行的。

经过一代又一代的积累,欧洲人的地中海航行知识日渐丰富,并且以文字的形式被记载下来。罗马帝国时期的希腊学者斯特拉波曾介绍说,当时有两种航海著作,一种是记载航海路线的《航海总汇》,另一种是介绍各个港口情况的《港口大观》。公元3世纪后半期,一位不知名的作者在《沧海航程纪》中罗列了地中海周边的众多港口及各港口之间的距离。这部希腊文著作,被誉为“唯一存世的、真正的古希腊航海作品”。

12世纪,古代中国四大发明之一的指南针传入欧洲,被制成航海罗盘用于航海。13世纪,罗盘已普遍应用于地中海航行中。航海者可以利用罗盘来确定航行方向,而不再依靠航海地标进行模糊的估算。到13世纪后期,西欧出现了一种“海道指南图”,现存最早的实物,就是法国巴黎所藏的“比萨航海图”。水手们利用罗盘、“海道指南图”、沙漏等仪器,根据船只航行的方向及速度,就可以估测出船只当前所处的位置,并且推算出下一时刻的位置。这种导航方法,被称为“航位推算法”。千百年来,地中海一直是欧洲人进行航海活动的主要舞台。12世纪后期,伊比利亚半岛出现了独立的葡萄牙王国。由于葡萄牙濒临大西洋,所以自然把航海的重点放在大西洋上。而欧洲人在地中海航行中所积累起来的航海知识与技术,则成为葡萄牙人在大西洋中进行探险的技术基础。

2. 从观测北极星到观测太阳

进入15世纪,一批又一批精通地中海航行的水手投奔到葡萄牙国王的麾下,他们携带着用于地中海航行的仪器进入大西洋进行探险。不过,地中海与大西洋有很大的不同。地中海基本风平浪静,大西洋则波涛汹涌;地中海位于北纬 30°N — 45°N ,南北距离并不大,非洲海岸线则越过赤道延伸到南纬 30 多度。因此,地中海的航海知识与航海技术并不适用于大西洋。

现实的需求,迫使葡萄牙人寻找新的航海导航方法。当时,葡萄牙人在大西洋上的探险活动是沿着非洲海岸线从北向南推进的。他们实际上从高纬度地区向低纬度地区进行航行。水手们很快发现,他们在葡萄牙里斯本所观测到的北极星高度,与他们在非洲几内亚所观测到的北极星高度是不一样的。这样,北极星就成了导航的坐标。

15世纪后期,葡萄牙人采用北极星导航方法后,加快了在大西洋上的探险活动。葡萄牙人沿着非洲海岸线从北向南逐渐前进。但当他们于1471年到达加纳沿海后,发现海岸线不断向东伸展。他们误以为沿着这条海岸线航行下去,就会很快到达印度。大约在1474年,葡萄牙船队穿越了赤道,到达南纬 2 度一带为止。从古希腊时代开始,欧洲就流传着这样一种说法:赤道地区阳光强烈,气候炎热,甚至海水都热得沸腾,人类根本无