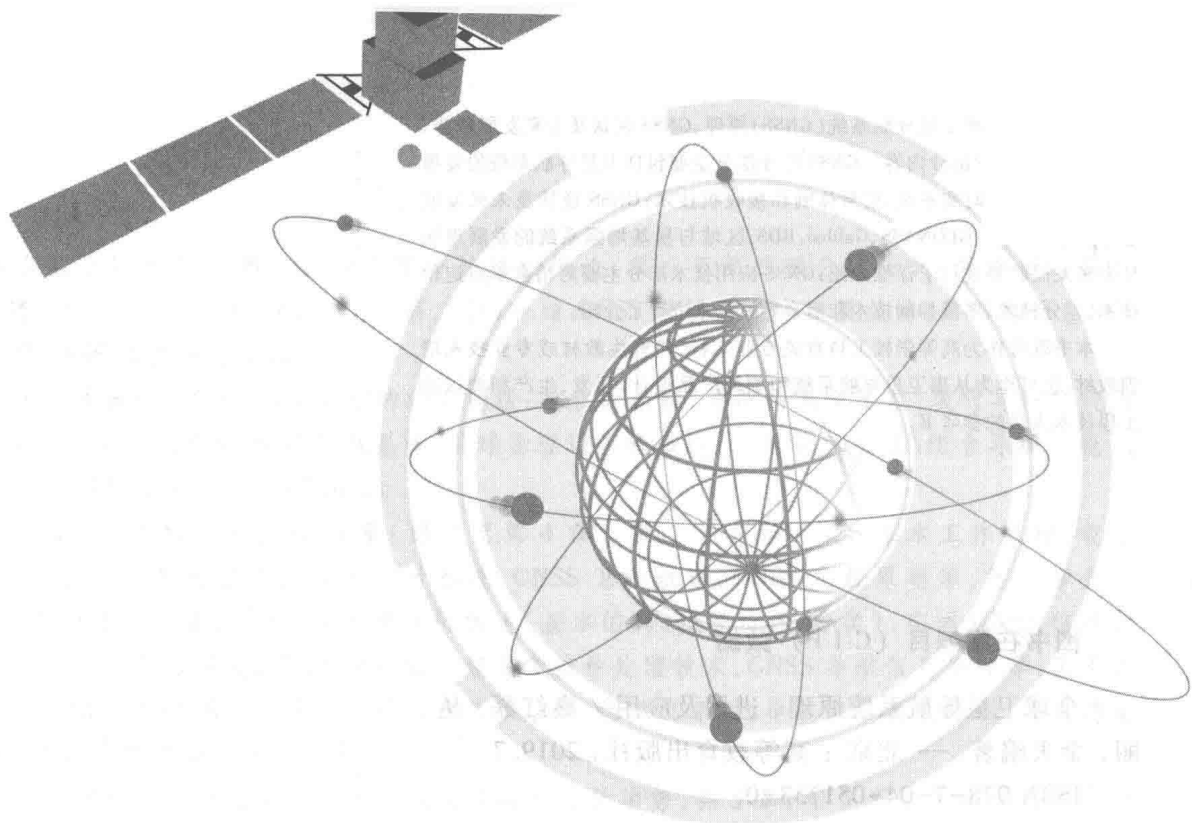


高等学校教材

# 全球卫星导航系统 原理、进展及应用

秦红磊 丛丽 金天 编著

高等教育出版社



高等学校教材

# 全球卫星导航系统 原理、进展及应用

秦红磊 丛丽 金天 编著

高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书主要介绍卫星导航系统(GNSS)原理、GNSS现状及未来发展趋势、GNSS应用技术三部分内容。GNSS原理部分主要包括卫星导航系统的发展历史、工作原理、时空系统、信号体制和接收机技术;GNSS现状及未来发展趋势部分对GPS、GLONASS、Galileo、BDS、区域与星基增强系统的发展现状与未来发展趋势进行了详细介绍;GNSS应用技术部分主要对精密单点定位技术、差分技术、多径抑制技术和组合导航技术进行了介绍。

本书既可作为高等学校工科有关专业本科、研究生教材或专业技术培训教材,也可作为从事卫星导航系统和相关产品设计、开发、生产和测试的工程技术人员参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

全球卫星导航系统原理、进展及应用 / 秦红磊, 丛丽, 金天编著. -- 北京: 高等教育出版社, 2019. 7  
ISBN 978-7-04-051733-0

I. ①全… II. ①秦… ②丛… ③金… III. ①卫星导航-全球定位系统-高等学校-教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第074036号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 黄涵玥 封面设计 于文燕 版式设计 于婕  
插图绘制 李沛蓉 责任校对 胡美萍 责任印制 刘思涵

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印刷 山东百润本色印刷有限公司  
开本 787mm × 1092mm 1/16  
印张 33.75  
字数 830千字  
购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版 次 2019年7月第1版  
印 次 2019年7月第1次印刷  
定 价 64.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 51733-00

本书共分为四部分,第一部分介绍导航技术概论,第二至第四部分为正文,其中第二部分(第一篇)介绍 GNSS 原理,第三部分(第二篇)介绍 GNSS 现状及未来发展趋势,第四部分(第三篇)介绍 GNSS 相关应用技术。

导航技术概论(第 1 章)中介绍的内容包括:导航的起源,导航的基本要素,现代导航系统及其分类(无线电导航系统、惯性导航系统、地球物理场导航系统、天文导航系统\组合导航系统),未来新型导航定位技术及 PNT 体系。

第一篇介绍 GNSS 原理,共 3 章(第 2 至第 4 章):第 2 章介绍 GNSS 基本工作原理,包括 GNSS 发展历史,GNSS 结构,GNSS 空时系统,GNSS 卫星轨道,GNSS 定位原理等;第 3 章介绍 GNSS 接收机工作原理,包括 GNSS 接收机概述(基本结构、性能指标、分类),空间 GNSS 信号特征,GNSS 接收机射频前端,GNSS 接收机中频基带信号处理技术,GNSS 导航信息处理等;第 4 章介绍 GNSS 信号体制,包括 GNSS 导航信号基本结构,伪随机序列,导航信号调制体制,恒包络复用技术,导航电文的编码与解码等。

第二篇介绍当前主要的 GNSS 的现状及未来发展趋势,共 5 章(第 5 至第 9 章):第 5 章介绍 GPS 卫星导航系统,包括 GPS 发展、规划及服务,GPS 基本结构,GPS 系统信号体制;第 6 章介绍 BDS 卫星导航系统,包括北斗卫星导航试验系统,北斗区域卫星导航系统,北斗全球卫星导航系统,北斗卫星导航系统特点,北斗卫星导航星基增强系统等;第 7 章介绍 GLONASS 卫星导航系统,包括 GLONASS 发展历史、规划及服务,GLONASS 系统基本结构,GLONASS 系统信号体制等;第 8 章介绍 Galileo 系统,包括 Galileo 发展历史、规划及服务,Galileo 系统基本结构,Galileo 系统信号体制等;第 9 章介绍区域及增强系统,包括美国 WAAS 系统、俄罗斯 SDCM 系统、欧洲 EGNOS 系统、印度 GAGAN 和 NAVIC 系统、日本 MSAS 系统和 QZSS 系统。

第三篇介绍几种主要的 GNSS 应用技术,共 4 章(第 10 至第 13 章):第 10 章介绍精密单点定位(PPP)技术,包括 PPP 的理论基础,PPP 的基本原理及流程,PPP 的现状与未来发展趋势;第 11 章介绍 GNSS 差分技术及应用,包括 GNSS 差分技术的基本知识,GNSS 差分定姿技术,GNSS 差分定位技术等;第 12 章介绍 GNSS 多径抑制技术,包括多径产生机理,多径对接收机的影响,多径抑制与消除技术;第 13 章介绍 GNSS 组合导航技术,包括惯性导航系统,组合导航系统方案设计,组合导航系统的容错设计等。

本书在编写过程中得到了北京航空航天大学原校长沈士团教授的大力支持,在技术上得到了谈展中教授的指导,丛丽副教授、金天副教授和岳崧博士做了大量的资料收集和整理工作和相关章节的编写工作。同时,该书也得到了教研室黄智刚教授、杨东凯教授、路辉教授、郎荣龄副教授、李锐高工等在相关技术方面的帮助。另外,刘鹏博士、梁宵博士、薛霞博士、吕庆水博士、杨再秀博士、杨建雷博士、王陆潇博士、杨茜和屈阳硕士参与了该书的相关章节的编写,李武涛博士、谭滋中博士和袁赫良博士等参与了本书的校对工作。在此,感谢他们在本书编写过程中做出的贡献。

本书不足和疏漏之处,敬请读者批评指正!编者及其邮箱:秦红磊, qhlmmm@sina.com; 丛丽, congli\_hlj@163.com; 金天, jintian@buaa.edu.cn。

编者

2018年8月于北京

引 言

<b>第 1 章 导航技术概论</b> .....	2
1.1 导航的起源 .....	2
1.2 导航的基本要素 .....	5
1.3 现代导航系统及其分类 .....	6
1.3.1 无线电导航系统.....	6
1.3.2 惯性导航系统 .....	14
1.3.3 天文导航系统 .....	15
1.3.4 地球物理场导航系统 .....	17
1.3.5 组合导航系统 .....	21
1.4 未来新型导航定位技术 .....	22
1.4.1 X 射线脉冲星导航技术.....	22
1.4.2 量子惯性导航技术 .....	24
1.5 PNT 体系 .....	25
习题 .....	26

第一篇 GNSS 原理

<b>第 2 章 GNSS 系统基本原理</b> .....	30
2.1 GNSS 发展历史 .....	30
2.1.1 Transit 系统 .....	30
2.1.2 Timation 系统 .....	32
2.1.3 621B 系统 .....	32
2.1.4 GPS 系统起源及发展 .....	32
2.2 GNSS 系统结构 .....	33
2.3 GNSS 空时系统 .....	36
2.3.1 GNSS 空间系统 .....	36
2.3.2 GNSS 时间系统 .....	42
2.4 GNSS 卫星轨道 .....	45
2.4.1 卫星运动机理 .....	45
2.4.2 卫星的无摄动轨道 .....	47
2.4.3 卫星的摄动轨道 .....	50
2.4.4 GNSS 卫星轨道的计算 .....	50
2.5 GNSS 定位原理 .....	56
2.5.1 GNSS 定位的基本原理 .....	56

2.5.2	GNSS 伪距测量	58
2.5.3	GNSS 误差来源	60
2.5.4	GNSS 性能指标	69
	习题	83
<b>第 3 章</b>	<b>GNSS 接收机原理</b>	<b>85</b>
3.1	接收机概述	85
3.1.1	接收机基本结构	85
3.1.2	接收机性能指标	86
3.1.3	接收机分类	90
3.2	空间 GNSS 信号特征	91
3.2.1	空间信号链路功率预算	91
3.2.2	载噪比的计算	93
3.2.3	多普勒频移的计算	94
3.3	前端	99
3.3.1	天线	99
3.3.2	射频变换	110
3.3.3	模数变换器	114
3.3.4	射频前端设计举例	117
3.4	中频基带信号处理	122
3.4.1	相关与相干累加	122
3.4.2	捕获	127
3.4.3	跟踪技术	144
3.5	GNSS 导航信息处理	170
3.5.1	位同步	170
3.5.2	帧同步	173
3.5.3	信道编码及解码	174
3.5.4	伪距计算	175
3.5.5	导航参数解算	177
3.6	接收机自主完好性监测技术	187
3.6.1	完好性的概念及性能指标	187
3.6.2	RAIM 算法原理及流程	188
3.6.3	典型 RAIM 算法	189
	习题	196
<b>第 4 章</b>	<b>GNSS 信号体制</b>	<b>199</b>
4.1	GNSS 导航信号基本结构	199
4.2	伪随机序列	201
4.2.1	m 序列	201

4.2.2	Gold 码 .....	202
4.2.3	Weil 码 .....	203
4.2.4	Random 码 .....	204
4.2.5	Neuman-Hofman(NH)码 .....	205
4.3	导航信号调制体制 .....	206
4.3.1	BPSK 调制 .....	207
4.3.2	BOC 调制 .....	208
4.3.3	MBOC 调制 .....	212
4.3.4	AltBOC 调制 .....	217
4.3.5	TDDM 调制 .....	228
4.4	恒包络复用技术 .....	229
4.4.1	正交调制复用(QPSK) .....	229
4.4.2	Interplex 复用方式 .....	230
4.4.3	CASM 复用方式 .....	231
4.4.4	多数表决复用方式 .....	232
4.4.5	POCET 复用方式 .....	233
4.4.6	ACED 复用方式 .....	235
4.5	导航电文的编码与解码 .....	235
4.5.1	汉明编码 .....	236
4.5.2	CRC 编码及解码 .....	238
4.5.3	BCH 编码及解码 .....	240
4.5.4	卷积编码及解码 .....	243
4.5.5	LDPC 编码及解码 .....	245
4.5.6	交织及解交织 .....	247
	习题 .....	248

## 第二篇 GNSS 现状及未来发展趋势

第 5 章	GPS 卫星导航系统 .....	252
5.1	GPS 发展、规划及服务 .....	252
5.2	GPS 基本结构 .....	253
5.2.1	空间段 .....	253
5.2.2	控制段 .....	255
5.3	GPS 系统信号体制 .....	259
5.3.1	信号频率 .....	260
5.3.2	L1C/A、L1P、L2C 和 L2P 信号 .....	261
5.3.3	L5 信号 .....	279
5.3.4	L1C 信号 .....	300
5.3.5	M 信号 .....	311

习题	312
<b>第 6 章 BDS 卫星导航系统</b>	<b>313</b>
6.1 北斗卫星导航试验系统	314
6.1.1 系统组成	314
6.1.2 系统功能	315
6.1.3 技术指标	316
6.1.4 工作原理	316
6.2 北斗区域卫星导航系统	317
6.2.1 系统组成及性能指标	317
6.2.2 信号体制	319
6.3 北斗全球卫星导航系统	327
6.3.1 系统组成	327
6.3.2 系统功能	328
6.3.3 信号体制	328
6.4 北斗卫星导航系统特点	330
6.5 北斗卫星导航星基增强系统	330
习题	331
<b>第 7 章 GLONASS 卫星导航系统</b>	<b>332</b>
7.1 GLONASS 发展历史、规划及服务	332
7.2 GLONASS 系统基本结构	333
7.2.1 空间段	333
7.2.2 地面控制段	334
7.2.3 地理和时间参考	335
7.3 GLONASS 系统信号体制	336
7.3.1 FDMA 信号	337
7.3.2 CDMA 信号	343
习题	344
<b>第 8 章 Galileo 系统</b>	<b>346</b>
8.1 Galileo 发展历史、规划及服务	346
8.2 Galileo 系统基本结构	347
8.2.1 空间段	348
8.2.2 地面控制段	350
8.2.3 区域设施部分(regional components)	354
8.2.4 局域设施部分(local components)	354
8.2.5 用户接收机及终端	355
8.3 Galileo 系统信号体制	355
8.3.1 射频特性	356

8.3.2	调制体制	357
8.3.3	扩频码	362
8.3.4	电文结构	365
8.3.5	电文内容	374
	习题	380
<b>第 9 章</b>	<b>区域及增强系统</b>	<b>381</b>
9.1	美国 WAAS 系统	382
9.1.1	系统组成、功能和工作原理	382
9.1.2	WAAS 的数据处理流程和算法	383
9.1.3	播发的消息格式	386
9.1.4	系统目标及发展规划	387
9.2	俄罗斯 SDCM	388
9.2.1	系统组成	388
9.2.2	系统服务性能分析	389
9.2.3	系统发展现状	390
9.3	欧洲 EGNOS 系统	390
9.3.1	系统组成	390
9.3.2	性能服务及现状	391
9.4	印度 GAGAN	391
9.5	日本 MSAS	392
9.6	印度 NAVIC 系统	393
9.6.1	空间段	393
9.6.2	控制段	394
9.6.3	导航信号	394
9.7	日本 QZSS	395
9.7.1	空间段	396
9.7.2	播发信号	396
	习题	397

### 第三篇 GNSS 应用技术

<b>第 10 章</b>	<b>精密单点定位技术</b>	<b>400</b>
10.1	PPP 的理论基础	401
10.1.1	基本观测值与观测方程	401
10.1.2	观测值的线性组合	402
10.2	PPP 的基本原理及流程	407
10.2.1	PPP 主要误差来源	407
10.2.2	PPP 的观测模型	418

10.2.3	PPP 模糊度的处理	423
10.2.4	PPP 的定位解算	428
10.3	PPP 的现状与发展趋势	429
	习题	429
<b>第 11 章</b>	<b>GNSS 差分技术及应用</b>	<b>431</b>
11.1	GNSS 差分技术的基本知识	431
11.1.1	GNSS 的基本观测量	431
11.1.2	载波相位差分的组合方式	432
11.1.3	整周模糊度解算方法	434
11.2	GNSS 差分定姿技术	446
11.2.1	姿态角的定义	447
11.2.2	基线与站星距的关系	448
11.2.3	定姿单频单模单历元常见模型	449
11.2.4	多频多系统定姿模型	453
11.3	GNSS 差分定位技术	454
11.3.1	GNSS 差分系统工作原理	454
11.3.2	载波相位差分定位	456
11.3.3	周跳的探测技术	458
11.3.4	载波平滑码伪距技术	461
11.3.5	高稳定度数据处理	464
	习题	466
<b>第 12 章</b>	<b>GNSS 多径抑制技术</b>	<b>468</b>
12.1	多径产生机理	468
12.2	多径对接收机的影响	469
12.3	多径抑制与消除技术	470
12.3.1	非参量式	472
12.3.2	参量式	480
	习题	487
<b>第 13 章</b>	<b>GNSS 组合导航系统</b>	<b>489</b>
13.1	惯性导航系统	490
13.1.1	INS 导航定位工作原理	490
13.1.2	INS 系统误差方程	491
13.2	组合导航系统方案设计	495
13.2.1	联邦滤波器	495
13.2.2	GNSS/INS 组合	497
13.2.3	INS/CNS/GNSS 组合	505
13.2.4	JTIDS/INS/GNSS/IFDL/TACAN 多导航源组合	507

13.3 组合导航系统的容错设计 .....	515
13.3.1 故障模式 .....	515
13.3.2 突变故障检测 .....	516
13.3.3 基于 GARCH 模型的缓变故障检测 .....	518
13.3.4 故障来源判定 .....	520
13.3.5 联邦滤波器容错系统设计 .....	524
习题 .....	526

# 引 言

1957年10月4日，苏联第一颗人造卫星的发射使卫星导航系统的诞生成为可能，美国第一个卫星导航系统Transit及后续系统621B和Timation的设计及实现为现代卫星导航系统的发展奠定了技术基础。

自20世纪70年代以来，全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)已成为人类获取位置和时间信息的重要手段，由于具备全球性、全天候、高精度的导航定位能力，GNSS在国民经济建设、军事国防等领域发挥了不可或缺的重要作用。因为GNSS的重要作用，所以世界各主要大国都竞相研究发展其各自自主的导航卫星系统。当前，主要的GNSS系统包括美国的GPS ( global positioning system )、俄罗斯的GLONASS ( global navigation satellite system )、欧洲的Galileo系统及中国的北斗卫星导航系统BDS，另外日本、印度等国也建设了相应的区域及增强卫星导航系统。

北斗建设自2000年至今，已经具备了导航、定位、授时及短报文通信服务的能力，并在测绘、电信、水利、渔业、交通运输、森林防火、减灾救灾和公共安全等诸多领域，产生了显著的经济效益和社会效益。因此，学习、了解GNSS的工作原理、现状及发展趋势、应用技术对于培养我国相关的技术人才，充分发挥BDS的应用效能具有重要的意义。

本书以GNSS原理、现状及未来趋势和相关应用技术为主要内容，全面介绍GNSS发展历史、空时系统、信号体制、接收机原理、GPS、GLONASS、Galileo系统、BDS、区域及增强系统、GNSS差分技术及应用、精密单点定位技术、多径抑制及组合导航等技术。

# 第1章 导航技术概论

导航的英文单词“navigation”来源于梵文“navgatih”，拉丁语“navis”意为“船”，“navigation”可以直接翻译为“船舶熟练操作的水平”，即“航海”。后引申为所有载体的“航行”，其定义为“监测和指引控制载体从一个地方安全和高效地移动到另一个地方的过程”，即导航包括两个层次的含义，第一，监测和指引，监测即实时感知载体的位置、速度和姿态等导航必要的信息，指引即引导载体按照一定的规则向目的地运动；第二，安全和高效，即在保证载体安全的情况下，以最快的速度到达目的地。定位即给出载体的位置信息，因此定位是导航的基础。本书所说的导航定位系统，一般指可以给出载体位置、速度、姿态和时间等导航信息的系统，即导航的监测功能，完整的导航系统需要包括地图和引导策略等。

## 1.1 导航的起源

最原始的导航方式为地标(landmark)导航，即采用陆地上的标志物进行导航。英国历史学家兼作家汤姆·布鲁克斯在其新作《史前英国几何学》中提到，在英国南部发现了一套建立于5 000年前的原始的地标“导航系统”，这套古代“导航系统”依靠的是许多建在山丘或高地上的定位地标，在英格兰南部和威尔士发现了众多这样的地标。他通过分析发现，从诺福克到北威尔士的1 500个地标通常是巨石或山顶城堡等明显标志物，每个地标都在相邻地标的视野范围内。这些地标排列有序，组成一系列等腰三角形。每个三角形两条等边的公共顶点位置就是一处古代村落。这套“导航系统”工作原理类似于近代地质测量中常用的“三角测量法”。布鲁克斯利用GPS在坐标图中把这些定位点标出后发现，虽然有些三角形边长超过160 km，但所有地标误差均不超过100 m，依靠这种“导航系统”，当地古代居民不用携带地图就可以随意出行而不必担心迷路。

我国早在东汉时期就发明了用于指引方向的“司南”，司南的“司”就是“指”的意思，因此也称为“指南针(compass)”。指南针采用天然磁石，将其打磨雕刻成勺型，放在青铜做成的打磨光滑的地盘上，再刻上方向标识，磁勺的勺柄方向一直指向正南。

早期导航技术是随着航海技术的发展而发展起来的。早在公元前3 500年，人类已经开始采用船舶进行货物商业贸易，这标志着人类导航技术的诞生。由于海上缺少类似陆地上的标志物，无法采用地标导航方式，所以早期的航海家都是在靠近海岸线时用肉眼观察陆地的地标来辨别方向，他们通常白天航行，晚上休息。后来采用了天文导航(celestial navigation)，即利用对自然天体的测量来确定自身位置和航向的导航技术，由于天体位置是已知的，测量天体相对于导航用户参考基准面的高度角和方位角就可计算出用户的位置和航向。早期的天文导航在白天一般采用太阳作为参照物，晚上采用发光的星体作为参照物，一般选择方向不受地球自转影响的极星

(靠近天极的恒星)作为导航星。公元前1000年,天文导航已应用于从希腊穿越地中海到埃及的航行中,采用的参照星体主要有大熊座、天龙座和小熊座等。

在古代的航海导航系统中,如果想得到用户当前的位置,需要知道用户所在位置的经度和纬度。纬度的测量相对较容易,如图1.1所示,通过测量用户观测极星与用户所在地水平面的夹角,即可计算出用户纬度;由于地球的自转,经度的测量比较困难,一般采用推位法(dead reckoning)进行测量。如图1.2所示,当用户从地球的A点航行到B点时,需要测量用户航行的方向、速度及时间,航向一般采用磁罗盘测量,由于不同纬度的相同经度间隔距离不同,所以航位推算法需要与纬度测量联合使用。

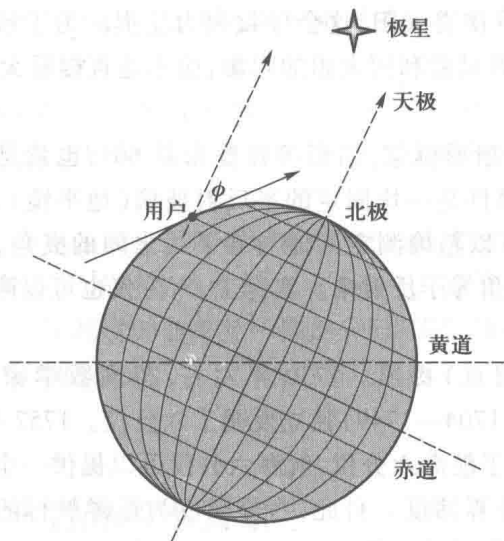


图 1.1 利用天文导航测量地球纬度原理图

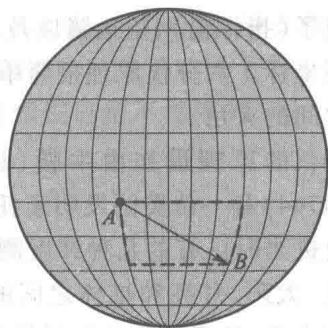


图 1.2 推位法航海过程示意图

随着中世纪(公元5世纪到15世纪)文艺复兴运动和大航海时代的到来及工业革命进程的发展,航海贸易的需求迅速增长,各种技术得到了飞速发展,出现了多种航海导航工具,主要包括以下几种。

### 1. 罗盘

磁罗盘是最早应用于航海的导航工具之一,由于人们当时并没有认识到地理北极与地磁北极的不一致,所以其精度不高。只有当太阳不可见时,才用于辅助导航。

工业革命后随着机械制造技术的进步,出现了由机械陀螺(gyro)组成的罗盘(也称为电罗经)。电罗经利用地球自转和陀螺进动效应来指北,从而测量用户的航向。电罗经广泛用于船只导航,这是因为相对于磁罗盘它们具有两个重要的优点:(1)它们指向地球自转轴(真北),而不是磁北;(2)它们不受铁磁性材料的影响,例如船体的钢壳,因此稳定性比磁罗盘高。

### 2. 航海图

航海图(nautical chart)简称海图,是航海的必备工具。航海图是海洋区域和邻近沿海地区的图形表示形式,根据不同尺度的图表,它可以显示水的深度、海底的自然特征、对海岸和航行危险细节的标注、自然和人为的航标位置、潮汐和海流的信息、地球磁场的局部细节等。许多国家都要求船舶特别是商用船,装备海图才能进行运输。海图最早出现于13世纪中期,由于受到人类对地球的认识的限制和测量工具的影响,早期的海图并不精确。当前海图已发展为电子海图,

并进一步向 3D 发展。

### 3. 星盘

最早的星盘(astrolabe)发明于约公元前 200 年的古希腊,最早的发明人并没有资料记载,一般历史学家普遍认为古希腊的天文学家喜帕恰斯(约公元前 190—前 120 年)是它的发明人。星盘是一种用来测量恒星的高度以及黄道十二宫的仪器,可以有效地解决天文测量中的很多有关模拟计算的问题。

### 4. 直角器

直角器(cross staff)出现于 14 世纪,早期用来进行土地测量,后来用于航海太阳高度的计算。使用直角器的一个主要问题是使用者必须直接看太阳,这会导致视力受损。为了解决这个问题,1594 年约翰发明了一种反向直角器,使用者只需利用太阳的阴影,而不是直接看太阳。

### 5. 六分仪

顾名思义,六分仪(sextant)的主体就是一个扇形框架,扇形的弧度角是  $60^\circ$ ,也就是圆周的  $1/6$ ,另外也有四分仪和半分仪。六分仪的主要部件是一块固定的半反射玻璃(地平镜)、一块可活动的镜子(指标镜)、望远镜以及活动臂。它可以精确测定天体与地平线之间的夹角,从而推算出地理坐标。六分仪原理很简单:光线的入射角等于反射角。实际上,六分仪也可以测量任意两物体之间的夹角。

六分仪的原理最初由牛顿(以及更早的胡克)提出。1730 年左右,英国数学家哈德利(1682—1744)和一位美国发明家托马斯戈弗雷(1704—1749)独立发明了六分仪。1757 年,坎贝尔船长改进当时已有的几种纬度测量工具,发明了航海六分仪,航海六分仪可以提供更准确的地平线、太阳、月亮和星体之间的角度,以便计算纬度。自此,六分仪成为远洋航行的必备仪器。直到今天,最现代化的舰船仍配有六分仪以备不时之需。

航海六分仪在扇形框架背面有手柄供握持用,框架上装有活动臂,活动臂最上端即是指标镜;半反射式地平镜安装在六分仪的左侧,地平镜旁边还配有滤光片供测量太阳等明亮天体时使用。测量天体地平高度时,观测者手持六分仪,让望远镜筒保持水平,并从望远镜中观察被测天体经地平镜反射所成的像;同时要调节活动臂,使星象落在望远镜中所见的地平线上。在天体的像与地平线重合时,该天体高度等于地平镜与指标镜夹角的二倍。而根据这一点来恰当地设计圆弧标尺上的刻度,就可以让观测者直接读出天体高度。为提高读数精度,实际的六分仪活动臂上往往还附有鼓轮和游标尺。六分仪的精度比较高,最高能达到 10 角秒,且轻便易用,所以它能够迅速取代之前操作复杂的星盘,成为在海洋上测量地理坐标的利器,也彻底解决了精确地确定海上航线这一困扰无数航海家的难题。

六分仪最大的缺点是受天气的影响较大,不能在阴雨天使用。而制造过程中会不可避免地引入机械误差,这也成了限制六分仪精度的一个因素。

历史上,六分仪除了在航海方面发挥了重大作用外,还曾帮助天文学家编制高精度星表。而星表的编制也促进了航海的发展,同时还给地理坐标的测量带来了重大进步。另外还有航空六分仪,其结构与航海六分仪基本相同,但望远镜视野中的地平线由水准线代替。

### 6. 测程板

航海测程板(chip log)通过水来测量船的速度。船员把测程板连接到一根打结的绳子,计算给定时间内通过他们的手的节数,从而确定船舶的速度,时间一般用沙漏来计算。测程仪最早出

现于 15 世纪末至 16 世纪初,荷兰人声称第一个发明该装置,但该发明属于葡萄牙。

航海速度单位用节(knot,单位符号 kn)来表示,1 节(kn)=1 n mile/h=(1 852/3 600)m/s。

### 7. 计时器

在推位航行的测量过程中,时间的精度至关重要,因此早期出现了多种计时装置。计时仪器的发展历程为:日光钟→水钟→沙钟→机械钟→电子钟。前三种是古代所用的,现代电子钟现已广泛被人们采用,成为人们生活中不可缺少的一部分。

沙钟也称为沙漏,是由漏刻(水钟)演变而成的。漏刻有一个缺点,在气候寒冷时壶内水分会降低温度甚至结冰,以致流速极慢或不流,但用水银又过于昂贵,因而改用沙代替水,并将之简化,称之为“沙漏”。沙漏是最早出现的定时装置,最早被发现于中国、希腊、意大利等地,被广泛使用于航海。

1764 年,英国钟表匠哈里森(1693—1776)发明了航海精密定时器。1779 年,英国海军军官、探险家杰姆斯船长用哈里森的天文环球航行,验证了基于定时器计算的经度误差小于 13 km。

注:海里是航海上度量距离的单位,通常表示为 nm、NM、nmi 或 n mile。它等于地球椭圆子午线上纬度 1'所对应的弧长(1 n mile=2 倍子午线长度÷360÷60)。由于地球子午圈是一个椭圆,它在不同纬度的曲率是不同的,所以不同纬度 1'所对应的弧长也是不相等的。中国标准中,1 n mile=1.852 km。

## 1.2 导航的基本要素

导航包括导航参数、导航系统、载体、环境、应用领域、时空系统六大基本要素,如图 1.3 所示。

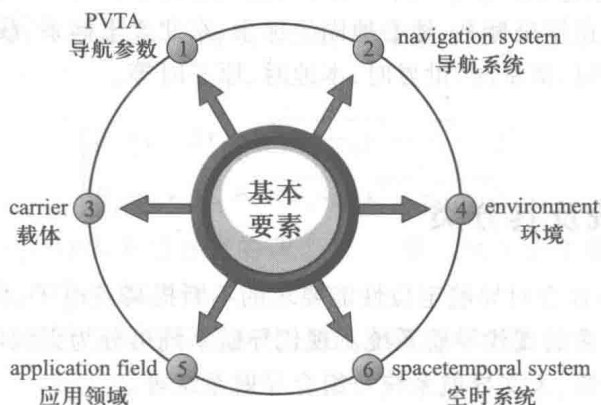


图 1.3 导航的基本要素

### 1. 导航参数

一个导航系统的输出应满足用户需求的导航参数,导航参数包括 10 维:位置(position)3 维、速度(velocity)3 维、时间(time)1 维和姿态(attitude)3 维。根据不同的需求,相应的导航参数又有不同的定义。