

高等学校教材

卫星导航系统 概论 (第二版)

Introduction to
Satellite Navigation Systems

边少锋 纪兵 李厚朴 编著



测绘出版社

高等学校教材
军队“2110 工程”三期建设教材

卫星导航系统概论

Introduction to Satellite Navigation Systems

(第二版)

边少锋 纪 兵 李厚朴 编著

测绘出版社

· 北京 ·

© 边少锋 2016
所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 简 介

本书介绍了卫星导航常用的坐标系统、时间系统和卫星轨道确定的基础知识,在此基础上较全面地介绍了当前国际上主要的卫星导航系统——GPS、GLONASS 和北斗卫星导航系统的系统组成、信号格式、导航定位的工作原理等,同时介绍了各类增强系统和卫星导航领域的新技术,并对卫星导航定位技术在国民经济与军事领域的应用进行了展望。

本书可作为本科生和研究生学习卫星导航知识的教材,也可作为相关专业科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航系统概论/边少锋,纪兵,李厚朴编著. —北京:测绘出版社, 2016.8
高等学校教材
ISBN 978-7-5030-3985-0

I. ①卫… II. ①边… ②纪… ③李… III. ①卫星导航—导航系统—高等学校—教材 IV. ①TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 193740 号

责任编辑	贾晓林	封面设计	李 伟	责任校对	程铁柱	责任印制	陈 超
出版发行	测绘出版社			电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号				010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045				010—68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com			网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司			经 销	新华书店		
成品规格	184mm×260mm			彩 插	3		
印 张	14.5			字 数	355 千字		
版 次	2016 年 8 月第 1 版			印 次	2016 年 8 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1000			定 价	39.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3985-0

审 图 号 GS(2016)691 号

本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

前 言

本书第一版于2005年出版。虽然国内外卫星导航方面的教材很多,但在当时的情况下,对我国北斗卫星导航系统(简称北斗系统)进行全面介绍的教材并不多见。本书第一版吸收了北斗系统当时的最新资料,对北斗系统进行了较全面的介绍,一定程度上满足了当时的教学需求,对普及北斗系统知识起到了一定作用。

本书第一版出版至今已经十年有余,国内外卫星导航系统发生了翻天覆地的变化,取得了显著的进展,尤其是我国的北斗系统,已从试运行的工程试验“北斗双星系统”发展至覆盖亚太地区的三维导航定位系统,其组成结构、体系、定位原理等方面都已发生了相当大的变化,因此很有必要综合目前各卫星导航系统发展的最新进展对本书第一版进行全面的修订。

本书是为导航工程等相关专业本科生学习卫星导航课程而编写的教材,在内容编排方面学时数要比课程标准要求的多一些,具体使用时,有些内容可以根据实际需要做一些取舍。同时,本书也可以作为相关专业人员的参考书。

本书共分8章。第1章、第6章、第8章由边少锋撰写,第2章由边少锋、李厚朴共同撰写,第3章由李厚朴撰写,第4章和第5章由纪兵、李厚朴共同撰写,第7章由纪兵撰写。全书最后由边少锋统稿。

本书由国家自然科学基金(No.41274013)资助出版,为军队“2110工程”三期建设教材。在本书撰写过程中,博士生向才炳在前期收集编写资料和素材方面做了大量工作,博士生吴泽民在后期书稿校对方面提供了帮助,金际航、吴苗、李方能、曹可劲、汪捷等对教材的修改提出了许多有益的意见与建议,在此一并表示感谢。

由于编著者学识水平有限,书中错误和不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。编著者的电子信箱为 sfbian@sina.com、jibing1978@126.com、lihoupul985@126.com。

作 者

2016年于海军工程大学

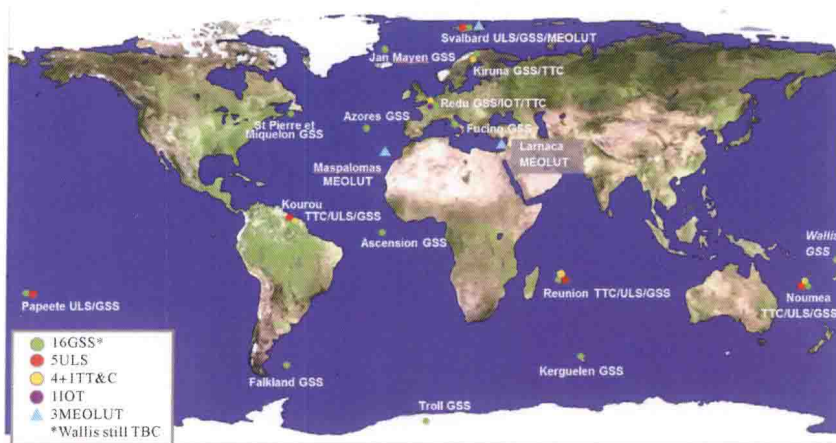


图 1.9 Galileo 候选地面监测站分布

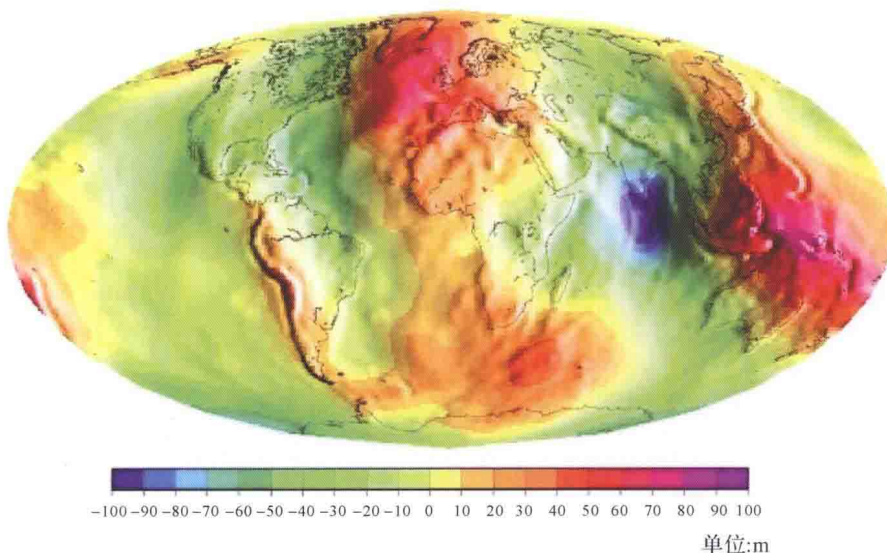


图 2.12 EGM2008 全球大地水准面起伏图

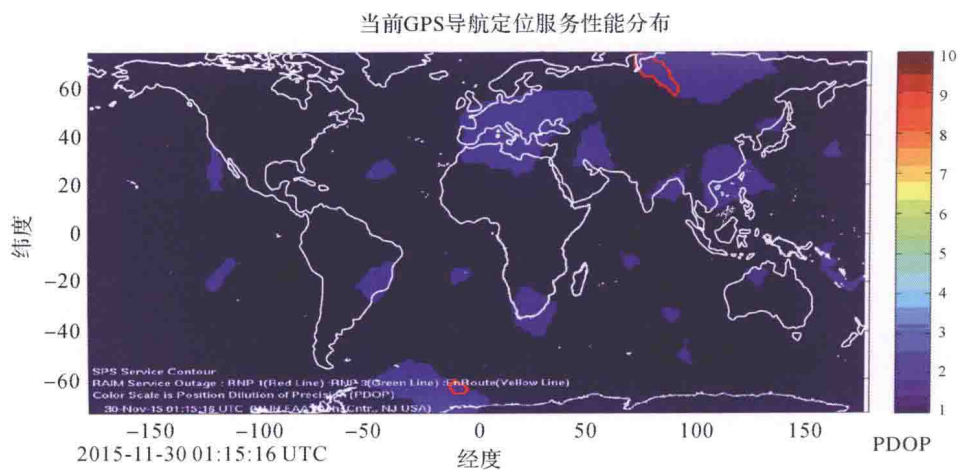


图 4.35 GPS PDOP 瞬时全球分布图

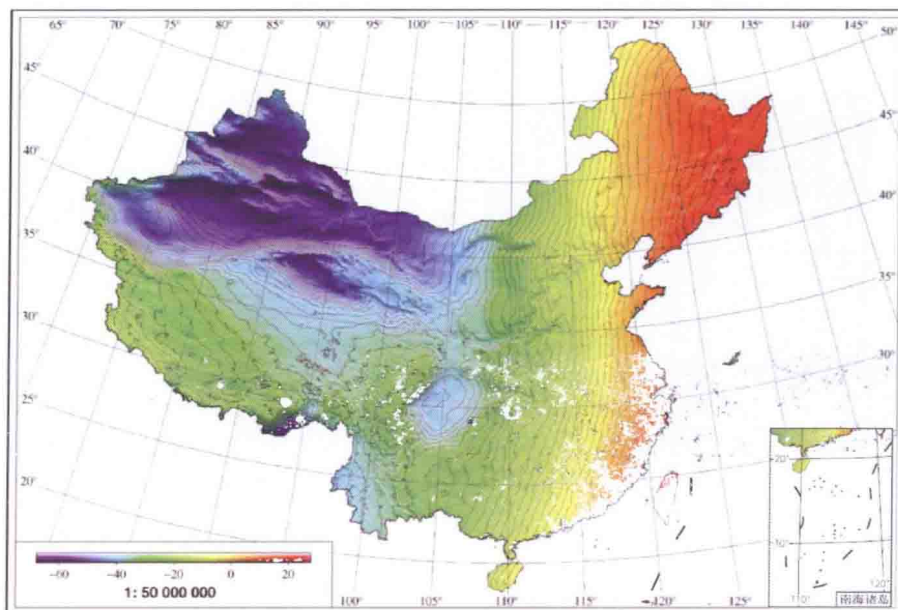
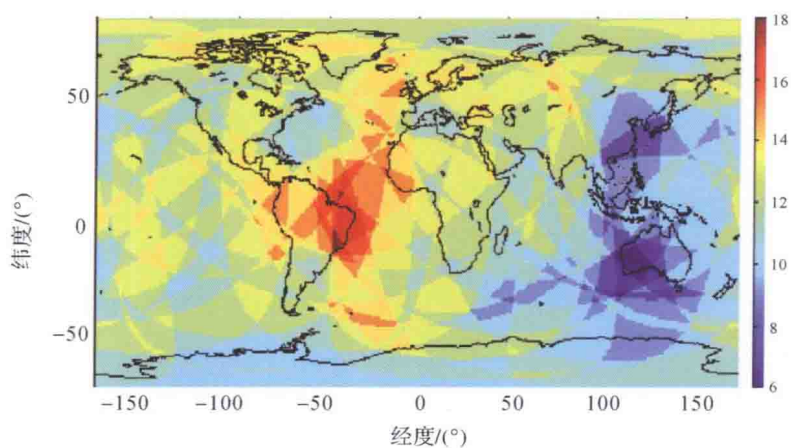
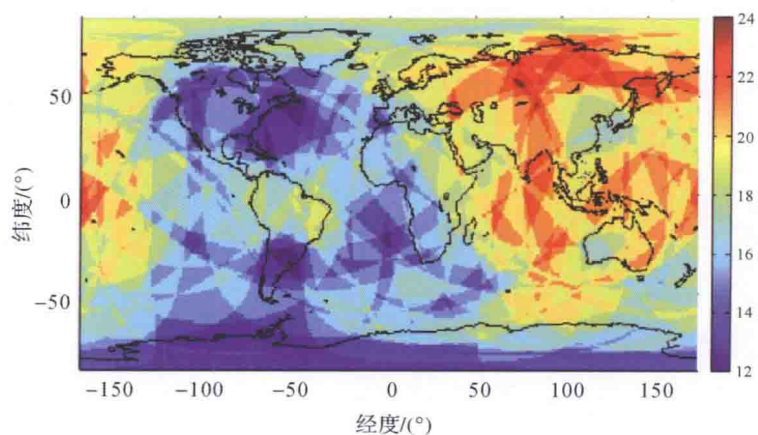


图 2.13 我国最新重力似大地水准面 CNGG2011 等值线图



(a) GPS卫星可见性



(b) GPS与北斗系统双系统卫星可见性

图 6.25 地面用户可见导航卫星数目

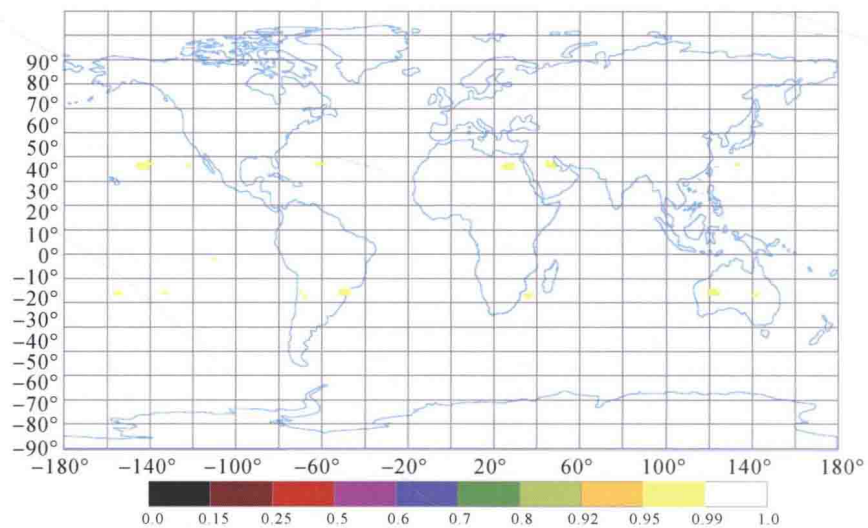
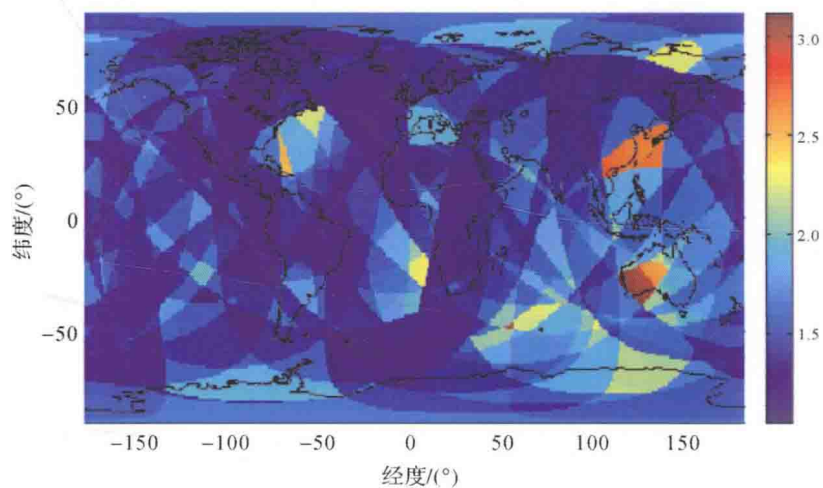
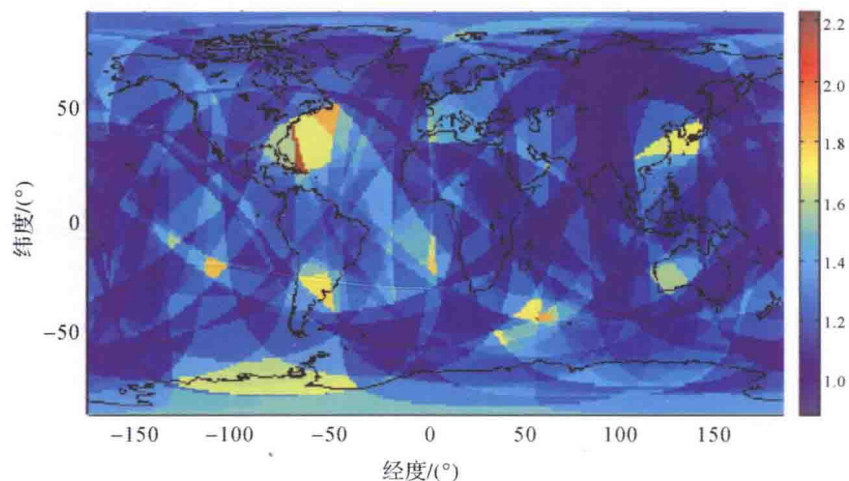


图 5.11 GLONASS 单日平均可用性全球分布图



(a) GPS GDOP值



(b) GPS与北斗系统双系统GDOP值

图 6.26 0 km 高度时 GDOP 值全球分布

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 导航的基本概念和发展	1
1.2 卫星导航定位系统的特点	4
1.3 卫星导航定位系统的发展概况	5
1.4 卫星导航定位系统的分类	18
1.5 卫星定位的基本原理	20
1.6 卫星导航的应用和发展	22
习题与思考题	24
第 2 章 导航常用坐标系与时间系统	25
2.1 常用坐标系	25
2.2 天球坐标系	26
2.3 大地水准面与参考椭球	29
2.4 WGS-84 世界大地坐标系	30
2.5 CGCS 2000 国家大地坐标系	32
2.6 地固直角坐标系与大地坐标系转换	34
2.7 大地坐标微分公式	39
2.8 站心切平面坐标系	42
2.9 天文坐标系	44
2.10 高斯投影平面直角坐标系	47
2.11 墨卡托投影平面直角坐标系	50
2.12 卫星时间系统	52
习题与思考题	55
第 3 章 导航卫星轨道确定基础知识	56
3.1 开普勒三定律与卫星轨道参数	56
3.2 二体问题的运动方程	58
3.3 卫星星历计算基础	63
3.4 卫星的受摄运动	66
3.5 卫星的工作区域	69
3.6 导航卫星轨道参量的选择	74
3.7 地球同步卫星	76
习题与思考题	80

第 4 章 GPS 全球定位系统	81
4.1 GPS 的系统组成与功能	81
4.2 GPS 信号	89
4.3 GPS 信号的接收	102
4.4 GPS 定位测速的基本原理	107
4.5 GPS 定位误差分析	113
4.6 差分 GPS 定位	120
习题与思考题	125
第 5 章 俄罗斯 GLONASS 导航卫星系统	126
5.1 GLONASS 的系统组成	127
5.2 GLONASS 信号	134
5.3 GLONASS 卫星位置计算	142
5.4 GLONASS 参考系统	143
5.5 GPS 与 GLONASS 技术体制比较	145
习题与思考题	150
第 6 章 北斗卫星导航系统	151
6.1 北斗卫星导航试验系统	151
6.2 北斗卫星导航系统简介	161
6.3 北斗卫星导航信号	164
6.4 北斗导航电文及应用	170
6.5 北斗公开服务性能	174
6.6 北斗授时	180
6.7 北斗系统应用现状与展望	183
习题与思考题	187
第 7 章 卫星导航增强系统	188
7.1 美国广域增强系统	190
7.2 美国局域增强系统	191
7.3 欧洲地球同步卫星导航增强服务系统	192
7.4 日本准天顶卫星系统	193
7.5 印度 GPS 辅助地理增强导航系统	195
7.6 GNSS 多系统组合应用	195
习题与思考题	197
第 8 章 卫星导航新技术与展望	198
8.1 GNSS 软件接收机	198
8.2 辅助 GNSS 技术	200

8.3 GNSS 气象学	203
8.4 GNSS 空间应用技术	205
8.5 基于卫星导航定位系统的物联网与车联网技术	208
8.6 卫星导航技术发展展望	209
8.7 我国卫星导航产业发展展望	213
习题与思考题.....	216
 参考文献.....	 217
 附录 A 中外文术语对照	 220
 附录 B Mathematica 计算机代数系统	 221
 附录 C STK 仿真软件.....	 222

第1章 绪论

导航是引导运载体按一定航线航行的过程。从导航的“航”和其英文名称 navigation 及其发展历史来看,导航最早应用于海上航行的舰船和海军,以后随着科学技术的发展,其应用对象又被扩大至飞机、导弹、飞船、坦克、车辆和单兵等。

1.1 导航的基本概念和发展

导航(或早期的航海)是一门古老的学科。中国是世界四大文明古国之一,据史料记载,早在 4 000 年以前,黄帝和蚩尤作战时,为了辨明方向以追击敌人,就曾使用了指南车;中国很早就发明了利用地球磁场指明方向的司南(指南针),如图 1.1 所示。

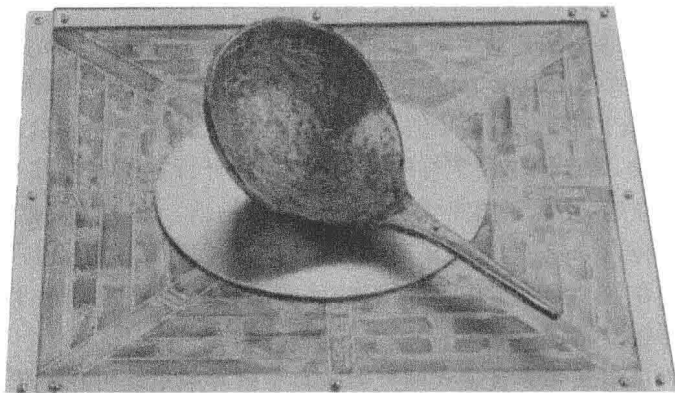


图 1.1 司南

15 世纪明代永乐至宣德年间,郑和七下“西洋”,船队规模庞大,最多时达 200 多艘,其中,长 148 m、宽 60 m 的大型船舶有 60 艘。舟师“昼识罗盘,夜观天象”,利用罗盘、测深器、牵星板(类似于现在的六分仪)等仪器,船队“云帆高张,昼夜星驰,涉彼狂澜,若履通衢”,在“洪涛接天,巨浪如山,视诸夷域,迥隔于烟霞缥缈之间”的海上,“涉沧溟十万余里”,创造了我国和世界航海史上的壮举。古代地中海国家的航海和贸易也促进了海上导航和天文导航的发展。17 世纪初,欧洲各国开始进入资本主义社会,对外贸易的发展和海上掠夺殖民地的战争也促进了当时航海业的发展。在当时的条件下,天文学已经发展到了一定的水平,为了确定船舶的位置,人们就利用星体在一定时间与地理位置具有固定关系的原理,发展了通过观测星体确定船舶位置的天文导航方法。1519 年,也就是大约在郑和下西洋一个世纪之后,葡萄牙航海家麦哲伦利用海图、地球仪、经纬仪、四分仪、圆规、磁针、沙漏计时器、测速器等导航和定位设备进行了环球航行。随着科学的发展和时代的进步,运载体对导航定位精度及其他要求也越来越高,磁罗盘和原始的天文导航方法已经不能满足现代导航的需要了。

导航是实时测定运动载体或人员的位置和速度,并引导其沿一定的航线到达目的地的方

法。导航技术最先被用于海上航行,这是很自然的,因为在茫茫的海上,根本不可能像在陆地上那样找到可供利用的参照物。随着科学技术的发展,导航技术的应用对象又被扩大至飞机、导弹、飞船、坦克、车辆和单兵等。导航过程中应能够随时提供反映载体运动状态的位置、速度、姿态以及相对于航行目的地的其他一些参数,以便于载体沿着航行安全、用时较短、费用经济的路线到达目的地。但在这些导航参数中,最重要的还是载体的位置参数,所以导航的核心是定位,要实现导航必须对运动体实时定位,以便与目的地的位置进行比较,计算前进的距离和方向。一般来说,导航与定位的区别在于:导航是对运动点而言,观测时间很短,观测数据需要实时处理,提供相对参考位置的相对坐标,定位精度不如固定点高;定位一般是对固定点而言,允许较长时间的观测,观测数据事后处理,提供绝对坐标,定位精度较高。能够导航的系统必须能够定位,能够定位的系统未必能够导航,这取决于观测器材能否在运动载体上获得足够精度的观测量。

导航的实现依赖于一定的设备或系统,能够完成这种引导功能的就称为导航设备或系统。这些设备或系统有的非常简单,如指南针、罗盘;有的非常庞大,如近代的卫星导航系统。根据导航所依附的物理技术手段,导航又可分为地磁导航(如指南针)、陆标导航(如港口灯塔)、天文导航、惯性导航、无线电导航,直至近代的卫星导航。

导航设备有两种工作状态:一是指示状态,这种状态下导航设备只提供载体的运动参数和引导驶向目的地的航行参数,驾驶人员根据这些信息控制载体航行(如操舵),导航设备不直接参与对载体的控制;二是控制状态,即导航设备将导航信息直接提供给自动驾驶仪,如根据导航系统提供的导航参数,结合预先设定好的计划航线,可自行控制舵机改变舰船航向、控制主机调速装置调节舰船航速,使舰船按照预定航线到达目的地。这种用导航系统控制航行系统的方式,称为制导,如弹道导弹、人造卫星运载火箭的飞行控制系统就是制导,也就是自动导航系统。不论导航系统在何种状态工作,导航系统的核心任务就是准确地、即时地、全面地提供载体的运动参数和导航参数。

导航系统可分为自主式和非自主式两大类。自主式导航系统可在不依靠外界信息或不与外界发生联系的条件下独立完成导航任务,而非自主式导航系统必须有地面设备或依靠其他外部信息才能完成导航任务。自主性在军事上特别重要,自主式导航系统可保证载体(如军用飞机、水面舰艇、潜艇等)能独立、自主、安全、隐蔽地执行自己的任务,而不受外部导航设施的制约。

无线电导航的发明可以说是近代导航史的开端,它使导航技术成为航行中真正可以依赖的工具,因此对于导航技术的发展来说具有划时代的意义。在第一次世界大战期间,人们就发明了无线电导航信标台。各信标台发射调制有信标台识别信号的连续无线电波,用户通过可转动的环形天线测定其到信标台的方向,当两个或两个以上信标台的方向可以被测定时,就可以根据这些方向的交点以及信标台的位置计算出舰船的位置。第二次世界大战及战后是导航技术大发展的时期。罗兰 A(Loran-A)、台卡(Decca)、罗兰 C(Loran-C)、奥米伽(Omega)等无线电导航系统相继出现。这些无线电导航系统从本质上说均是双曲线定位系统。各导航台以一定的重复周期相互同步地发射无线电导航信号,船载接收机接收两个导航台的信号,即可测量这两个信号到达接收机时间的差值,用这个时间差值乘以无线电传播的速度即可得知接收机与两个导航台的距离差值,从而可知用户位于一条以两个发射台为焦点且位于地球表面的一条双曲线上;再测量另两个导航台信号的时间差值,即可知接收机位于地球表面的另一条双

曲线上,这两条双曲线的交点便是接收机所在的位置。以罗兰 C 系统为例,它的导航信号脉冲载波频率为 100 kHz 左右,作用距离达 2 000 km。正常情况下,罗兰 C 的单次定位精度能达到百米级,不过罗兰 C 接收机用户的实际定位精度还要受导航台与接收机的几何分布、接收机的性能以及电磁波传输条件等因素的限制。20 世纪 60 年代,我国在沿海地区布设了罗兰 A 台链,取名为“长河一号”;20 世纪 90 年代,又分别在南海、东海和北海布设了罗兰 C 台链,取名为“长河二号”。如图 1.2 所示为世界罗兰 C 台站的分布图,这些系统定位不像天文导航那样受气象条件的影响较大,但导航是区域性的,精度也比较低。

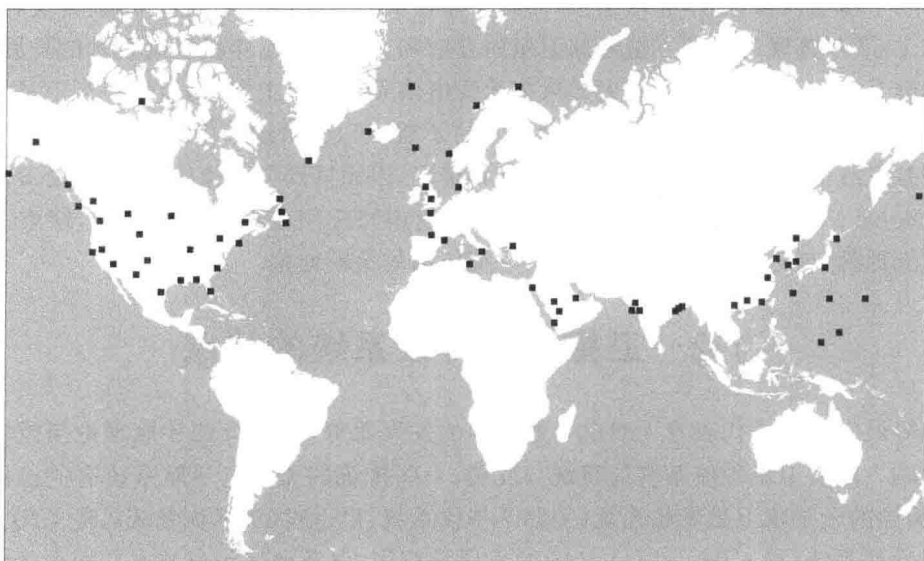


图 1.2 世界罗兰 C 台站的分布

与天文定位相比,无线电定位无论是在定位的速度还是在自动化程度方面都有了长足的进步,定位精度也有所改善,而且定位已基本不受气候条件的限制,然而,地面无线电导航定位系统的作用距离(覆盖)和定位精度之间会产生矛盾。低频率的无线电波可以沿着地球表面传播到很远的地方,但长波信号的观测精度较差,且信号的传播路径又难以准确确定,加之信号需要在稠密的大气层中远距离传播,而用户又无法测定信号传播路径上的气象元素,因而难以进行准确的气象改正等原因,一些覆盖面大的地面无线电导航定位系统的定位精度较低。使用高频率的信号虽然可以获得较高的精度,但信号是沿着直线传播的,受地球曲率影响,覆盖面很小。因此,各个部门为了满足各自的应用要求相继建立了各种不同类型的地面无线电导航定位系统,如罗兰 C、微波着陆系统、甚高频全向信标加测距器、塔康导航系统等。

惯性导航是根据牛顿力学原理,通过测量载体的加速度,经过积分运算得到运载体的速度和位置的导航方法。1942 年德国在 V-2 火箭上第一次安装上了初级的惯性导航系统,以提供火箭的姿态和入轨初速度,这一工作引起了人们极大的重视,推动了惯性导航的研究。1978 年美国研制的 MK2mod7 型惯性导航系统与静电陀螺监控器组合使用,使“三叉戟”核潜艇的定位精度在 48~72 小时内可达到 0.2 海里,重调周期 14 天,这表明惯性导航技术已经十分成熟。当前国外惯性器件技术的发展目标是实现高精度、高可靠性、低成本、小型化、数字化。一方面,陀螺的精度不断提高,漂移量可突破 $10^{-6} (^{\circ})/\text{h}$ 级别;另一方面,随着四频差动激

光陀螺、光子晶体光纤陀螺等新型固态陀螺仪的逐渐成熟,以及高速大容量计算机技术的进步,捷联式惯性导航系统正呈现取代平台式惯性导航系统的趋势。预计到 2020 年高精度机械陀螺在大部分应用领域将被光纤陀螺所取代。惯性导航系统有许多优点,它不依赖于外界导航台和无线电的传播,因此其应用不受环境限制,可用于陆、海、空、天以及水下导航定位;隐蔽性好,不会被干扰,无法反利用,生存能力强;输出信息量大,可以输出载体的三维位置、三维速度和航向姿态信息。惯性导航的这些优点使它在现代国防科技中占有十分重要的地位。但是惯性导航的定位误差是随时间积累的,很难满足海上舰船长时间使用的要求,并且高精度惯性导航设备属于精密仪器,成本非常昂贵,因此只能在少数大型舰船上装备,难以普及利用。

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,人们很自然地想到如果把无线电信号从卫星上发射,组成一个卫星导航定位系统,就能较好地解决覆盖面与定位精度之间的矛盾,于是,出现了卫星导航定位系统。由于它具有地基无线电导航系统无法比拟的优点和精度,因而得到了迅速发展,特别是美国全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的投入使用和应用范围的不断扩大,结束了传统的天文导航和地面(或近地)无线电导航定位系统长期的垄断地位。

1.2 卫星导航定位系统的特点

卫星导航定位技术代表着无线电导航技术的发展趋势,对传统的导航理论与技术产生了深远的影响。随着卫星导航系统的建设与发展,一些传统的无线电导航系统有的已经关闭或退役,如美国的子午仪卫星导航系统(简称子午仪系统)已退役,奥米伽系统已经关闭。一些已有的卫星导航系统,如 GPS、GLONASS 的发展与应用,以及地理信息技术在国民经济发展中凸显出的重要作用,促使一些国家和地区开始建设和发展自身的卫星导航系统,如欧洲正在建设中的伽利略卫星导航系统(Galileo)、中国的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)、日本的准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system, QZSS)等。其中, GPS、GLONASS、Galileo、BDS 为全球导航系统,为方便起见,本书将以上卫星导航系统统称为全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)。GNSS 有如下特点。

1.2.1 覆盖区域广

GNSS 能为全球任何地点和近地空间用户提供连续的导航能力。而地面(或近地)无线电导航定位系统有效作用范围有限,子午仪系统也只能进行断续定位,且平均定位间隔为 1.5 h 左右。

1.2.2 测量精度高

GNSS 能连续地为各类用户提供三维位置、三维速度和精确的时间信息。如 GPS 相对定位精度在 50 km 以内可达 10^{-6} , 在 100~500 km 范围内可达 10^{-7} , 在 1 000 km 以上可达 10^{-9} ; 在 300~1 500 m 工程精密定位中, 1 h 以上观测的解算, 其平面误差小于 1 mm, 测速精度优于 0.1 m/s; 相对于 GPS 时间标准的授时精度优于 10 ns, 而相对协调世界时(coordinated universal time, UTC)的授时精度优于 1 μ s, 将来有可能提高到 100 ns。

1.2.3 观测时间短

一般的用户接收机冷启动时间约 35 s,热启动时间为 1 s,定位数据更新率可达 100 Hz,这对于飞机、火箭、导弹等高动态用户来说有重要意义。GNSS 用于快速静态相对定位测量时,当每个流动站与基准站相距在 15 km 以内时,流动站只需观测 1~2 min;用于动态相对定位时,流动站开始作业前先观测 1~2 min,然后可以随时定位,每站观测仅需几秒钟。

1.2.4 测站之间无须通视

GNSS 测量不需要测站之间互相通视,只需测站上空开阔即可,因此可以节省大量的造标费用。由于无需点间通视,点定位位置根据需要可疏可密,选点工作非常灵活,也可省去经典大地网中的传算点、过渡点的测量工作。

1.2.5 抗干扰能力强

GNSS 导航信号是用导航电文和伪随机码去调制高频载波而得到的。通过给不同的导航卫星分配不同的伪随机码,用伪随机码对导航电文进行调制,从而使导航信号的带宽被扩展,进而调制高频载波,实现码分多址(code division multiple access,CDMA),从而使卫星导航信号具有码分多址抗干扰性强的基本特点。

1.2.6 操作简便

GNSS 测量的自动化程度很高,在观测中测量员的主要任务是安装并开关仪器、量取仪器高、监视仪器的工作状态和采集环境的气象数据,其他的观测和数据记录等均由仪器自动完成。另外,GNSS 测量设备的体积小、重量轻,携带和搬运方便,大大减轻了测量工作者的劳动强度。

1.3 卫星导航定位系统的发展概况

美国的 GPS 是迄今为止发展最成功的卫星导航系统,成为卫星导航系统的典范;俄罗斯的 GLONASS 经过过去几年的卫星补网发射,现已完成系统重建;中国也已初步完成覆盖亚太区域的北斗卫星导航系统建设;其他国家和地区,如欧盟、日本和印度也分别发展和提出了各自的卫星导航系统计划。

1.3.1 美国子午仪卫星导航系统

美国子午仪卫星导航系统又称为海军导航卫星系统(navy navigation satellite system, NNSS)。1964 年在军事上正式投入使用,1967 年开始提供民用,目前已停止使用。

子午仪卫星导航系统由三部分组成,即空间部分、地面监控部分和用户部分。空间部分由 6 颗高约 1 000 km 的卫星组成,它们分布在 6 个轨道平面内,其轨道面相对地球赤道的倾角约为 90° ,轨道形状近于圆形,运行周期约为 108 min。卫星发播 400 MHz 和 150 MHz 两种频率的载波,供用户及监测站对卫星进行观测。在 400 MHz 的载波上调制有导航电文,它向用户提供卫星位置和时间信息,用于测站位置解算。地面监控部分包括卫星跟踪站、计算中心和注

入站。跟踪站不间断地观测卫星,将数据传至计算中心;计算中心根据跟踪数据计算卫星轨道,并形成对应不同时间的一系列导航电文;注入站将电文注入卫星存储器,由卫星定时提供给用户。用户部分主要是用户接收机。用户接收机接收卫星发播的无线电信号,测量因卫星对接收机不断运动而产生的多普勒频移,并根据卫星发播的导航电文,计算卫星位置。由于多普勒频移反映了卫星与接收机相对运动速度,因此,它包含了卫星与接收机的相对位置信息,根据卫星位置就可以计算接收机的位置。

子午仪卫星导航系统只能提供二维导航解,取得 1 次导航解需对 1 颗卫星观测 8~10 min,定位精度一般优于 ± 40 m。不同地理位置的测站,平均 1.5 h 才能定位 1 次,利用卫星的瞬时位置和测站坐标之间的数学关系,可以计算出测站地心坐标。固定地面测站,每隔 1 h 可以观测到子午仪卫星通过 1 次,一般观测 40~50 次,利用收到的卫星星历和单点定位技术求得测站地心坐标,其精度为 $\pm 3 \sim \pm 5$ m。

苏联在 70 年代也建成过类似于子午仪系统的奇卡达(Tsikada)卫星导航系统。它由 6 颗导航卫星组成卫星网,轨道高约 1 000 km,与赤道面夹角 83° ,绕地球一周 105 min。系统工作频率为 400 MHz 和 150 MHz,信号调制方法和子午仪系统有所不同。

1.3.2 全球定位系统

子午仪卫星导航系统实现了全球导航定位,但是它不能提供连续、实时和三维定位服务。为克服子午仪卫星导航定位系统的这些局限,美国国防部于 1973 年正式批准研制导航星全球定位系统(navstar global positioning system),简称全球定位系统(GPS)。GPS 计划是美国国防部一项规模宏大的战略性计划,其目的是为美国各军兵种提供统一的导航定位及授时服务。

GPS 卫星从建设至今先后发展了 BLOCK I、BLOCK II、BLOCK II A、BLOCK II R、BLOCK II R-M、BLOCK II F 等多个型号,BLOCK III 卫星也在进一步研发之中。

GPS 卫星上最关键的设备是原子钟,它为 GPS 提供精确时间和频率标准。原子钟的精度和稳定性决定着导航、定位和授时的精度和稳定性,原子钟的可靠性决定着卫星的寿命。前三颗 BLOCK I 卫星每颗配置三台铷原子钟,由于早期铷原子钟的可靠性较差,而铯钟具有更好的性能,因此余下的 BLOCK I 卫星的原子钟改为三台铷钟、一台铯钟。BLOCK II 和 BLOCK II A 都配置两台铷钟、两台铯钟,BLOCK II 和 BLOCK II A 的铷钟性能优于铯钟,但是寿命却较铯钟短,只能用铯钟来满足寿命要求。BLOCK II R 铷钟解决了长寿命、可靠性的问题,BLOCK II R 和 BLOCK II R-M 卫星每颗只配置三台铷原子钟,BLOCK II F 卫星每颗配置两台铷原子钟和一台铯原子钟。

GPS 卫星的导航信号包括三个分量:载波信号、测距码和导航电文。导航电文与测距码进行模 2 加,所合成的信号被加载到载波上进行调制,然后将调制好的信号发送出去。载波信号使用 L 波段的三个频率:L1(1 575.42 MHz)、L2(1 227.60 MHz)和 L5(1 176.45 MHz)。GPS 伪随机噪声(pseudo random noise,PRN)码有 C/A 码、P 码、Y 码和 M 码。其中 C/A 码为民用码,P 码、Y 码和 M 码为军用码。BLOCK I、BLOCK II、BLOCK II A、BLOCK II R 卫星的导航信号在 L1 频段提供一个 C/A 码导航信号,在 L1、L2 频段各提供一个 P(Y)码导航信号。从 BLOCK II R-M 卫星开始,L2 频段增加了 L2 C 民用导航信号,L1、L2 频段各增加了一个 M 码军用导航信号,BLOCK II F 卫星又新增了 L5 频段的 L5 C 民用导航信号。

GPS 现代化计划在 BLOCK III 卫星上提供第四个民用信号 L1 C, 该信号是频率为 1 575.42 MHz 的二元补偿载波调制导航信号。民用信号的增多使得民用用户可以从不同频段获得 GPS 卫星导航信号, 并通过频率组合校正电离层传播的延迟, 从而提高民用用户的定位精度。新的 M 码的启用使军方导航信号和民用导航信号分离, 实现了不需要民用导航信号引导就可以直接访问 M 码军用导航信号, 提高了美国军用导航信号的安全性和抗干扰能力。

GPS 由三大部分组成, 即空间部分、地面控制部分和用户部分。

(1) 空间部分。原计划部署 24 颗卫星, 均匀分布在 3 个轨道面上, 后来调整为 24 颗卫星, 配置在 6 个轨道面上, 每个轨道面上分布 4 颗, 高度约 2 万 km, 倾角 55° , 周期 11 h 58 min, 各轨道面升交点赤经相差 60° , 相邻轨道面的邻近卫星的相位差 30° , 卫星轨道为近圆形。GPS 卫星星座的分布保证了在地球上任何地点、任何时刻至少有 4 颗卫星可供观测。

(2) 地面控制部分。由 1 个主控站、3 个注入站和 5 个监测站组成。主控站设在科罗拉多斯普林斯的联合空间执行中心 (Consolidated Space Operation Center, CSOC), 还有 1 个备用主控站设在加利福尼亚州。主控站完成轨道和时钟改正参数的计算, 发给注入站以向每颗卫星 (每隔 8 h) 注入导航信息和其他控制参数。3 个注入站设在大西洋的阿森松、印度洋的迪戈加西亚和太平洋的夸贾林。5 个监测站除了位于主控站和 3 个注入站的 4 个站以外, 还有设立在夏威夷的 1 个监控站。为克服监测站分布不均匀的缺陷, 近几年美国国防测绘局还在英国、南美、澳大利亚和中东等地增设了观测站, 以进一步提高轨道预报精度和计算精密星历。这些地面站的位置已由国防部测绘局精确测定, 其作用是对卫星进行连续监控 (对卫星的跟踪率可达 $90.6\% \sim 100\%$), 取得各项观测资料, 算出每颗卫星的 15 min 平滑数据, 传送到主控站进行处理和分析。由于卫星上不断储备有新的导航信息, 所以即使因故地面控制部分全部失效, 预先存储在卫星内的导航信息仍可支持 14 天预报。为支持地面控制系统, 海军天文台和国防测绘局还将提供与 GPS 时间协调的世界时, 并为计算星历提供精确的地球定向数据。

(3) 用户部分。由天线、接收机、数据处理机和控制与显示装置组成。现在世界范围内已有许多厂家生产出百种以上的 GPS 接收设备, 经过多年的发展, 其体积越来越小, 性能越来越高。以美国为例, 其 GPS 终端已应用于众多领域, 并在近年的战争中发挥了关键作用。美国目前已成功开发出选择可用性反电子欺骗模块 (selective availability anti-spoofing module, SAASM), 使 GPS 接收终端具有更高的安全性和抗干扰、反欺骗能力; 开发了具有自适应调零天线技术的 GPS 时空抗干扰接收机, 使 GPS 的抗干扰能力提高了 40~50 dB; 研制成功 P(Y) 码直捕 GPS 接收机, 接收机无需 C/A 码引导即可直接捕获 P(Y) 码的功能; 研制了集卫星遥感、超视距语音与数据通信和卫星导航功能于一体的接收机, 将战场测绘、通信指挥、搜救与定位多功能融为一体; 研制出了目前世界上体积最小的“锤头 II”接收机, 其体积仅为 $3.74 \text{ mm} \times 3.59 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ 。卫星导航接收机将向数字化、多通道、超小型、多功能、抗干扰、集成化、软件化的方向发展。

为了提高导航精度、可用性和完整性, 发展了各种差分系统。特别是利用地球静止轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 卫星建立的地区性广域差分增强系统, 如美国民航局开发的广域增强系统 (wide area augmentation system, WAAS), 欧洲的欧洲对地静止导航覆盖服务 (European geostationary satellite navigation overlay service, EGNOS), 以及日本的多功能卫星增强系统 (multi-functional satellite augmentation system, MSAS), 可提供附加区域卫