

全国高职高专测绘类专业通用教材 



# GPS测量技术

GPS SURVEY TECHNOLOGY

黄文彬 主编



测绘出版社

全国高职高专测绘类专业通用教材

# GPS 测量技术

GPS Survey Technology

黄文彬 主编

测绘出版社

·北京·

©黄文彬 2011

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

本书是高职高专院校 GPS 测量课程教材,主要讲述 GPS 定位原理、GPS 测量技术的设计方法与外业测量实施的基本技能以及 GPS 测量数据的处理方法。此外,对 GPS 技术在工程控制测量中的应用也作了简要介绍。全书共分 7 章,第 1 章至第 4 章主要讲解 GPS 技术的基本理论知识,第 5 章至第 6 章主要讲解 GPS 测量技术的实际应用方法,第 7 章为应用介绍。

本书可作为高职高专院校测绘类专业及相关专业的教学用书,也可供有关专业的工程技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

GPS 测量技术/黄文彬主编. — 北京:测绘出版社,  
2011. 1

全国高职高专测绘类专业通用教材

ISBN 978-7-5030-2050-6

I. ①G… II. ①黄… III. ①全球定位系统(GPS)—  
测量—高等学校—教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 006050 号

责任编辑 田 力 执行编辑 赵福生 封面设计 李 伟 责任校对 董玉珍 李 艳

出版发行 测绘出版社

地 址 北京市西城区三里河路 50 号

电 话 010-68531160(营销)

邮政编码 100045

010-68531609(门市)

电子信箱 smp@sinomaps.com

网 址 www.sinomaps.com

印 刷 北京金吉士印刷有限责任公司

经 销 新华书店

成品规格 184mm×260mm

印 张 11.25

字 数 273 千字

版 次 2011 年 1 月第 1 版

印 次 2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数 0001-3000

定 价 28.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-2050-6/P·513

本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

# 全国高职高专测绘类专业通用教材 编委会名单

顾 问：宁津生

主任委员：赵文亮

副主任委员：陈 平

委 员：（按姓氏笔画排列）

王晓春 全志强 杨建光 林玉祥

金 君 周 园 赵国忱 洪 波

聂俊兵 黄华明 薄志毅

## 参编学校及生产单位

(排名不分先后)

山西交通职业技术学院	扬州环境资源职业技术学院
山西建筑职业技术学院	成都理工大学
天津铁道职业技术学院	江西环境工程职业学院
无锡水文工程地质勘察院	沈阳农业大学高等职业技术学院
中国科学院地理所	张家口职业技术学院
中国第二冶金建设有限责任公司	武汉电力职业技术学院
甘肃工业职业技术学院	郑州测绘学校
甘肃林业职业技术学院	河北工程技术高等专科学校
石家庄铁道学院	河北政法职业学院
石家庄职业技术学院	陕西铁路工程职业技术学院
本溪市桓仁满族自治县国土资源局	徐州市众望装饰装修监理有限公司
包头铁道职业技术学院	徐州建筑职业技术学院
辽宁工程技术大学职业技术学院	胶州市规划局
辽宁地质工程职业学院	浙江水利水电高等专科学校
辽宁林业职业技术学院	黑龙江农业职业技术学院
辽宁省交通高等专科学校	湖北水利水电职业技术学院
辽宁科技学院	新疆工业高等专科学校

# 序

当今中国正处于国家信息化大潮之中,国家要通过推进信息化,促进现代化,加速我国经济、社会的发展。正是在国家信息化建设的大背景下促使测绘信息化的发展。国民经济建设和社会可持续发展对诸如时间、空间、属性这类地理空间信息或者说广义测绘信息的需求也在迅速增长。测绘学科和行业在国家信息化和现代化建设中发挥着越来越重要的作用。为了适应国家信息化建设的需求,测绘正开始步入信息化测绘新阶段。由此对测绘人才队伍建设提出了更高的要求。

我国的高等职业教育作为高等教育的重要组成部分,近年来得到了迅速发展,初步形成了适应我国社会主义现代化建设的高等职业教育体系,大大提高了服务社会的能力,也为我们测绘行业培养了大量高素质的技能型测绘专门人才。他们在全国测绘生产、企业部门,形成一支强有力的骨干力量。目前,我国的高职高专教育正处于探索和改革的重要阶段,其主要任务是加强内涵建设,提高教育质量,重点在于提高人才培养质量,因此要努力抓好实践教学和基础课两个课程体系建设,并使两个体系相互交融。通过课程体系、教学内容和教学方法的改革,让专业与职业有效结合,提高学生学习专业与市场需求的吻合度,增强就业竞争能力。因此在我国当前的高职高专教育的教学改革中,以工作过程为导向,突出“工学结合”,融“教、学、做”于一体的教学理念逐渐成为主导。

为了更好地配合高职高专教育教学改革,探索、开发与“工学结合”人才培养模式相适应的高职高专教育测绘类专业课程体系,加快培养能够满足生产、建设、服务和管理第一线需要的测绘类高技能实用人才,测绘出版社组织全国30多所高职高专院校中在教学一线工作的骨干教师和生产单位的专家,结合目前测绘技术的最新发展趋势及社会实际生产的技能需求,编写了这一套兼顾通用性与特色、适合高职高专教育测绘类专业的通用教材。

该套教材以高职高专教育教学改革的基本方向和总体要求为指导,从工作岗位和工作任务出发,以培养职业能力为本位,将生产中的实用技术、新技术更多地融入教材内容,很好地使行动导向与理论导向有机地结合,贯彻“工学结合”的编写主旨,表现出体系完整、联系紧密、通用性强、实用性好的特点,既适合高职高专教育测绘类专业教学使用,也可供相关专业工程技术人员学习参考,必将在推动测绘学科建设、促进高职高专教育测绘类专业教学改革和加快测绘高技能实用人才的培养等诸多方面发挥积极的推动作用。



教育部高等学校测绘学科教学指导委员会主任

中国测绘学会测绘教育工作委员会主任

中国工程院院士

2009年6月

# 前 言

本书是根据教育部《关于全面提高高等职业教育质量的若干意见》(教高[2006]16号)的文件精神,为配合高职高专教育教学改革,探索、开发与“工学结合”人才培养模式相适应的高职高专教育测绘类专业课程体系,组织全国30多所高职高专院校的骨干教师和生产单位的专家所编写的全国高职高专测绘类专业通用教材之一。

本书主要介绍了卫星定位技术的发展概况、GPS卫星定位基础知识、GPS卫星定位的误差来源及其影响、GPS测量技术设计与外业实施的方法、GPS测量数据的处理方法等方面的知识。重点讲述了GPS测量技术的设计方法与测量实施的基本技能以及GPS测量数据的处理方法,以便学生通过本课程的学习,能较好地掌握GPS技术用于工程测量的基本技能,为今后从事相关技术工作打下良好的基础。另外,本书还对GPS技术在几种工程控制测量中的应用作了简要介绍。

“GPS测量技术”是工程测量技术及其相关专业的一门实践性较强的专业课,是培养高素质、技能型、应用型、复合型人才而进行职业技能训练的主要课程之一。本书在编写过程中,充分吸收了以往高职高专教材的优点,紧密联系现阶段高职高专院校学生的实际情况,结合测绘生产现状,同时也考虑各高职高专院校的测绘设备和测绘软件的使用情况,力争弥补以往同类教材的不足,使本教材不仅可以满足各高职高专院校的教学需要,也可适应现阶段高等职业技术教育的要求。本书在编写上注意紧密结合高职培养目标,以培养学生技能、提高学生从业综合素质和能力为主,理论叙述力求深入浅出、通俗易懂。

本书由黄文彬(浙江水利水电高等专科学校)担任主编,范海英(辽宁科技学院)、刘玉江(黑龙江农业职业技术学院)任副主编,朱勇(扬州环境资源职业技术学院)、赵淑湘(甘肃林业职业技术学院)、徐振亮(辽宁工程技术大学职业技术学院)、李吉之(扬州环境资源职业技术学院)、杨国强(辽宁省本溪市桓仁国土资源局)、柳广春(辽宁科技学院)、黎曦(江西环境工程职业学院)任参编。徐振亮编写第1章、刘玉江编写第2章、赵淑湘编写第3章、范海英编写第4章、杨国强编写第5章、柳广春编写第6章,黄文彬、朱勇和李吉之共同编写第7章,黎曦编写附录。全书最后由黄文彬负责统稿,做了大量的修改。黄河水利职业技术学院的周建郑老师和重庆工程职业技术学院的贺英魁老师审阅了教材大纲,淮海工学院的周立老师审阅了教材大纲和全稿,在编写过程中还得到了浙江水利水电高等专科学校的陈熙祥和许昌两位老师的大力支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢!

本书适用于高职高专院校工程测量技术专业以及其他相关专业,并可作为通用教材使用。本书在编写过程中,参阅了大量文献(包括纸质版文献和电子版文献),引用了同类书刊中的一些资料。在此,谨向有关作者和单位表示感谢!同时对测绘出版社为本书的出版所做的辛勤工作表示感谢!

由于作者水平有限和时间仓促,书中难免还存在错误与不足之处,在使用中您有何建议和意见请随时与我们联系,我们将及时给予回复,并将您的建议反映在再版教材中。联系邮箱为:hwb\_623@163.com。

编者

2010年6月

# 目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 卫星定位技术的发展概况	1
§ 1.2 GPS 系统的组成	5
§ 1.3 其他卫星定位系统简介	6
§ 1.4 GPS 技术的应用概述	9
思考题	14
第 2 章 GPS 卫星定位基础知识	15
§ 2.1 GPS 定位的坐标系统及时间系统	15
§ 2.2 GPS 卫星的运动及其轨道	26
§ 2.3 GPS 卫星的码信号	34
§ 2.4 GPS 接收机	38
思考题	40
第 3 章 GPS 定位的基本原理	41
§ 3.1 概 述	41
§ 3.2 GPS 定位的基本观测量	42
§ 3.3 GPS 定位原理	51
§ 3.4 GPS 定位模式	70
思考题	72
第 4 章 GPS 测量误差分析	73
§ 4.1 GPS 测量误差的来源及分类	73
§ 4.2 与 GPS 卫星有关的误差	74
§ 4.3 与卫星信号传播有关的误差	77
§ 4.4 与接收机有关的误差	80
§ 4.5 与动态差分定位有关的误差	81
思考题	86
第 5 章 GPS 测量技术	87
§ 5.1 GPS 测量的技术设计	87
§ 5.2 GPS 测量外业准备和技术设计书的编写	93
§ 5.3 GPS 测量外业实施	96
§ 5.4 GPS 测量数据处理	101



---

§ 5.5	GPS 高程 .....	112
§ 5.6	GPS 测量原始数据的解析 .....	114
§ 5.7	GPS 技术总结与上交资料 .....	124
	思考题 .....	124
<b>第 6 章</b>	<b>GPS-RTK 测量及 CORS 系统 .....</b>	<b>126</b>
§ 6.1	GPS-RTK 系统的组成 .....	126
§ 6.2	GPS-RTK 测量的外业工作 .....	127
§ 6.3	GPS-RTK 施工放样方法 .....	129
§ 6.4	CORS 系统及其应用 .....	130
	思考题 .....	134
<b>第 7 章</b>	<b>GPS 技术在测量中的应用 .....</b>	<b>135</b>
§ 7.1	GPS 技术应用于控制测量的状况分析 .....	135
§ 7.2	GPS-RTK 技术在测量工程中的应用 .....	145
§ 7.3	GPS 在其他领域中的应用 .....	151
	思考题 .....	155
	参考文献 .....	156
附录 1	技术设计书参考样例 .....	157
附录 2	技术总结参考样例 .....	166

# 第1章 绪论

GPS 是美国军方研制的第二代卫星导航系统,现已被广泛应用于各个领域。本章从卫星定位技术的起源开始,简单地阐述了 GPS 卫星定位技术的发展过程、GPS 系统的组成及其各部分的作用和功能,随后还简要介绍了当今与 GPS 并存的其他卫星导航定位系统。同时,还简单说明了卫星定位技术的应用状况。

## § 1.1 卫星定位技术的发展概况

### 1.1.1 卫星定位技术的起源与发展

1957 年 10 月 4 日,苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星,这是人类致力于现代科学技术发展的结晶,它使人类的活动范围延伸到了大气层以外,极大地开阔了人们的视野,空间科学技术的发展从此迅速跨入了一个崭新的时代。世界各国大地测量学者也备受鼓舞,试图利用卫星导航与定位技术进行大地测量。

#### 1. 早期的卫星定位技术

卫星定位技术是利用人造地球卫星进行点位测量的技术。早期的人造地球卫星仅作为一种空间的观测目标,用于建立卫星三角网和卫星测距网。这种对卫星的几何观测能解决用常规大地测量技术难以实现的远距离陆地与海岛的联测定位问题。

卫星三角网是以人造地球卫星作为空间观测目标,由地面观测站对其进行摄影测量,测定测站至卫星的方向,来确定地面点的位置,如图 1-1 所示。由于该网易受卫星可见条件和天气条件影响,因此费时、费力,定位精度低。

卫星测距网是利用激光技术测定测站至卫星的距离作为观测值所组成的网,即在地面上利用激光测距仪对卫星进行测距,以达到定轨、定位的目的。这种方法虽然测距精度较高,可以达到厘米级,但利用这种定位方法要有 4 个站组成较好的图形,实行同步观测,这对于大面积布网来说是很困难的,因此未能普及。

20 世纪 60、70 年代,美国国家大地测量局在英国和德国测绘部门的协助下,用卫星三角测量的方法测设了有 45 个测站的全球三角网,点位精度可达 5 m。

但是,这种观测方法受天气和卫星可见条件的影响较大,而且不能测定点位的地心坐标。因此,卫星三角测量技术很快被卫星多普勒效应(Doppler effect)的定位技术所取代,卫星定位技术从把卫星作为空间观测目标的低级阶段,发展到把卫星作为动态已知点的高级阶段。

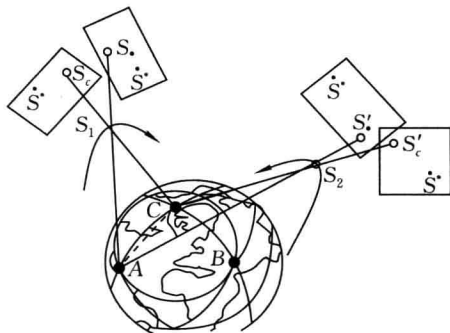


图 1-1 卫星三角测量

## 2. 多普勒定位系统

多普勒效应是为纪念奥地利物理学家及数学家克里斯琴·约翰·多普勒(Christian Johann Doppler)而命名的,他于 1842 年首先提出了这一理论。当声音、光和无线电波等产生源与观测者以相对速度  $v$  相对运动时,观测者所收到的频率与所发出的频率有所不同,这一现象称为多普勒效应。由多普勒效应所形成的频率变化叫做多普勒频移,它与相对速度  $v$  成正比,与振动的频率  $f$  成反比。

根据多普勒原理,当信号源(卫星)S 和信号接收处设备 R 间做相对运动时,接收处设备接收到的信号频率与信号源发射的频率不等。多普勒定位技术就是根据这个原理产生的,它的设想是:若已知在轨卫星的轨道参数,地面观测者又测得该颗卫星发射信号的多普勒频移,则可计算出测站的坐标。该设想即成为第一代卫星导航定位系统的基本工作原理。其几何意义如下:

设卫星  $S^j$  以频率  $f_s$  连续发射信号。在  $t_1$  时刻卫星位于  $S_1^j$  处,接收信号频率为  $f_1$ ;在  $t_2$  时刻卫星位于  $S_2^j$  处接收信号频率为  $f_2$ 。若利用地面跟踪站对卫星  $S^j$  进行观测并确定该卫星的运行轨道(即已知任一时刻卫星  $S^j$  在空间的位置),同时又对该卫星进行了多普勒测量,测得卫星  $S^j$  发射信号的多普勒频移,即  $S_1^j$  的多普勒频移  $(f_0 - f_1)$  和  $S_2^j$  的多普勒频移  $(f_0 - f_2)$ ,求得  $[t_1, t_2]$  时段中的多普勒计数  $N_{1,2}$ ,有

$$\Delta D_{1,2} = D_2 - D_1 = \lambda_s [N_{1,2} - (f_0 - f_s)(t_2 - t_1)]$$

式中,  $D_1$  和  $D_2$  为  $t_1$  和  $t_2$  时刻卫星至接收设备的距离;  $\lambda_s$  为发射信号的波长;  $f_0$  为接收设备产生的本振信号的频率。

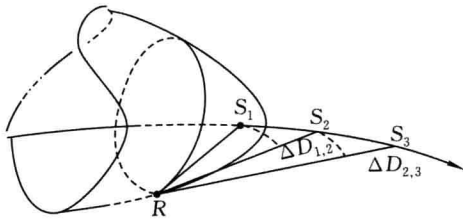


图 1-2 距离差交会(双曲线定位)

由于卫星信号源静止时发射的信号波长  $\lambda_s$  和  $f_s$  以及  $f_0$ 、 $t_1$ 、 $t_2$  均为已知值,  $N_{1,2}$  为多普勒测量中的观测值,故  $\Delta D_{1,2} = D_2 - D_1$  也已间接被测定。而  $t_1$  和  $t_2$  时刻卫星在空间的位置  $S_1$  和  $S_2$ , 可据卫星轨道求得,也是已知的。故用户(接收机)必位于以  $S_1$  和  $S_2$  为焦点的一个旋转双曲面上,该曲面上任一点至  $S_1$  和  $S_2$  的距离差均等于  $\Delta D_{1,2}$ (见图 1-2)。类似地,

如果我们也求得了在  $[t_2, t_3]$  时段内的多普勒计数  $N_{2,3}$  进而间接求得了  $\Delta D_{2,3} = D_3 - D_2$ , 则可以以  $S_2$  和  $S_3$  为焦点作出第二个旋转双曲面,该曲面上任一点至  $S_2$  和  $S_3$  的距离均等于  $\Delta D_{2,3}$ 。显然用户必位于这两个旋转双曲面的交线上。同样如果我们继续进行多普勒测量,测得  $N_{3,4}$ , 从而得到  $\Delta D_{3,4} = D_4 - D_3$ , 那么就能以  $S_3$  和  $S_4$  为焦点作出第三个旋转双曲面。该曲面与上述交线有一个交点,用户就位于该交点上。这就是多普勒定位的几何解释,子午卫星系统就是依此原理建造的。

## 3. 子午卫星系统

由于此前的无线电导航技术精度较低,并且使用条件受到极大限制,因此很难适应高精度定位的要求。1958 年,美国为解决北极星核潜艇在深海航行和执行军事任务而需要精确定位的问题,美国海军和约翰·霍普金斯大学应用物理实验室开始研制军用卫星导航系统,命名为海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System, NNSS),由于其卫星轨道为极地轨道,又称子午卫星系统(TRANSIT)。子午卫星系统是将卫星作为空间动态已知点,通过在测站上接收子午卫星发射的无线电信号,利用多普勒定位技术,进行测速、定位的卫星导航系统。

1960年4月,美国发射了世界第一颗子午工作卫星,其外观如图1-3所示。1964年建成该系统,星座如图1-4所示,建成后主要由美国海军使用,到1967年开始正式向民用开放。传统的无线电导航系统从此被这种新的导航方式取代,大地测量也由天文测量和三角测量时代进入卫星大地测量时代。

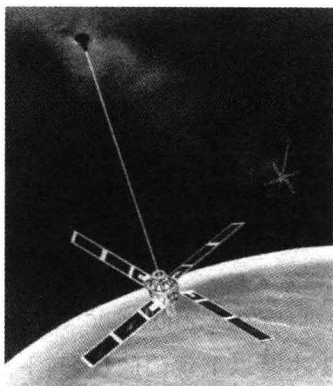


图 1-3 子午卫星外观



图 1-4 子午卫星星座

子午卫星系统是低轨道导航卫星系统,它集中了远程无线电导航台的全球覆盖和近程无线电导航台的定位精度高的优点,仅由4颗卫星组成的太空导航星座就能提供全天候、全球导航覆盖和周期性二维(经纬度)定位能力,使全球用户统一于地心坐标系中进行定位,使导航技术产生了革命性的突破。

虽然,子午卫星系统具有经济、快速、精度均匀、不受天气和时间的限制、可获得测站的三维地心坐标的优点,但由于该系统卫星数目较少(6颗),运行高度较低(平均1000 km,近圆形极地轨道),从地面站观测到卫星的时间间隔较长(平均1.5 h),因而它无法提供连续的实时三维导航,而且精度较低,单点定位精度约为30~40 m,每次定位约需8~10 min。由12颗宇宙卫星组成苏联卫星导航系统(CICADA)也存在上述缺点。

#### 4. GPS 定位技术发展

为满足军事和民用对连续、实时和三维导航的迫切要求,1973年美国国防部开始组织陆、海、空三军,共同研究建立新一代卫星导航系统的计划,这就是目前所称的“导航卫星授时测距/全球定位系统”(Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System),简称全球定位系统(GPS)。

GPS实施计划共分四个阶段,第一阶段为方案论证和初步设计阶段(1973~1979年),共发射了4颗概念试验卫星,研制了地面接收机及建立地面跟踪网,并完成了大量的测试项目。第二阶段为全面研制和大量试验阶段(1980~1989年),又陆续发射了11颗Block II试验卫星和1颗Block II A卫星,进一步完善了地面监控系统,发展了各种用途的GPS接收机。第三阶段为系统建成并进入运作阶段(1990~1999年),此间又发射了多颗Block II和Block II A卫星。1993年底实用的GPS网即“21+3”GPS星座已经建成,满足民用的标准定位服务的要求(100 m),1995年实现了精密定位服务(10 m)。第四阶段为GPS现代化与更新阶段(2000~2030年),为系统现代化和更新的时期。

1999年1月美国副总统戈尔以“GPS现代化”的名称发布通告,其具体实施是以2000年5月1日取消SA政策为标志。早在1996年,由美国国防部和交通部组成的联合管理事务局曾

讨论增加 GPS 民用信号。2005 年发射的 Block II R-M 卫星的  $L_2$  载波上增加 C/A 码,  $L_1$  与  $L_2$  载波上增加军用 M 码;2006 年发射的 Block II F 卫星上增加  $L_5$  载波;2012 年发射的 Block III 卫星上增加其他特殊功能。另外,通过增加卫星数,基本保证 GPS 卫星信号覆盖全球,即保证地球上 98% 的地区能同时观测到 4 颗以上 GPS 卫星。目前美国将 GPS 工作卫星已增加到 30 颗,并提高了 GPS 卫星钟的稳定性。20 世纪 80 年代发射的 GPS 工作卫星,采用的卫星钟为铷钟和铯钟,其稳定度为  $10^{-12}$ 。预计今后 GPS 工作卫星将采用氢钟,其稳定度为  $10^{-15}$ ;卫星的使用寿命也将从目前的 7.5 年延长到 15 年。

### 1.1.2 GPS 定位技术的特点

GPS 在用于导航与定位中,相对于传统的技术来说具有以下明显的特点:

#### 1) 定位精度高

应用实践已经证明,GPS 相对定位精度在 50 km 以内可达  $10^{-6}$ ,100~500 km 可达  $10^{-7}$ ,1 000 km 可达  $10^{-9}$ 。在 300~1 500 m 工程精密定位中,1 小时以上观测的解,其平面位置误差小于 1 mm。

#### 2) 观测时间短

随着 GPS 系统的不断完善、软件的不断更新,20 km 以内的相对静态定位,仅需 15~20 min;在快速静态相对定位状态下,当每个流动站与基准站相距在 15 km 以内时,流动站观测时间只需 1~2 min,然后即可随时定位,每站观测只需几秒钟。

#### 3) 测站间无须通视

GPS 测量不要求测站之间互相通视,只需测站上空开阔即可,因此可节省大量的造标费用。由于不需要点间通视,点位疏密可根据需要灵活选择,可省去经典大地网中的传算点、过渡点的测量工作。

#### 4) 提供三维坐标

经典大地测量将平面与高程采用不同方法分别施测。利用 GPS 测量技术可同时精确测定测站点的三维坐标,且高程测量结果可满足四等水准测量的精度。

#### 5) 操作简便

随着 GPS 接收机不断改进,其自动化程度越来越高,体积越来越小,重量越来越轻,极大地减轻测量工作者的工作紧张程度和劳动强度,使野外工作变得轻松。

#### 6) 全天候作业

目前 GPS 观测可在一天 24 h 内的任何时间进行,不受阴天黑夜、起雾刮风、下雨下雪等气候的影响。

#### 7) 功能多、应用广

GPS 系统不仅可用于测量、导航,还可用于测速、测时。测速的精度可达 0.1 m/s,测时的精度可达几十毫微秒。应用领域也不断扩大。当初设计 GPS 系统的主要目的是用于导航、收集情报等军事方面。但是,后来的应用开发表明,GPS 系统不仅能够达到上述目的,而且用 GPS 卫星发来的导航定位信号能够进行厘米级甚至毫米级精度的静态相对定位、米级至亚米级精度的动态定位、亚米级至厘米级精度的速度测量和毫微秒级精度的时间测量。因此,GPS 系统展现了极其广阔的应用前景。

## § 1.2 GPS 系统的组成

### 1.2.1 空间星座部分

GPS 卫星星座在 1993 年建成时由 24 颗卫星组成,分布在 6 个轨道面上。轨道面相对地球赤道面的倾角为  $55^\circ$ ,各轨道平面升交点赤经相差  $60^\circ$ ,一轨道面上的卫星比西边相邻轨道平面上的相应卫星超前  $30^\circ$ 。轨道平均高度约 20 200 km,运行周期 11 h 58 min,星座如图 1-5 所示。这样分布可以保证在地球的任何地方能同时见到 4~12 颗卫星,从而使地球表面的任何地点、任何时刻均能实现三维实时定位、测速和测时。

GPS 卫星的外观如图 1-6 所示,GPS 卫星在轨时依靠太阳能电池及镉镍蓄电池供电,其上还装有 4 台高精度原子钟,这是卫星的核心设备。

卫星有 12 根螺旋形天线组成的阵列天线,向地面发射张角为  $30^\circ$  的电磁波束,由一个推力系统保持卫星在轨位置及姿态调整,卫星姿态调整采用三轴稳定方式,使卫星天线始终对准地心。卫星设计寿命约为 7.5 年。

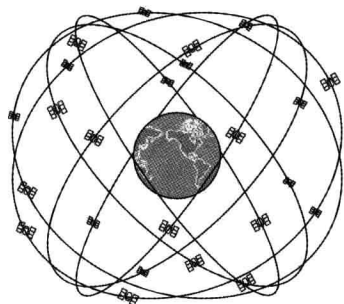


图 1-5 GPS 卫星星座

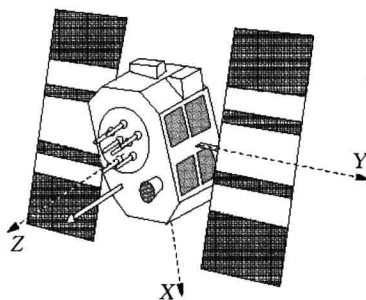


图 1-6 GPS 卫星外观

### 1.2.2 地面监控部分

GPS 的地面监控系统包括 1 个主控站、5 个监控站和 3 个注入站,如图 1-7 所示。

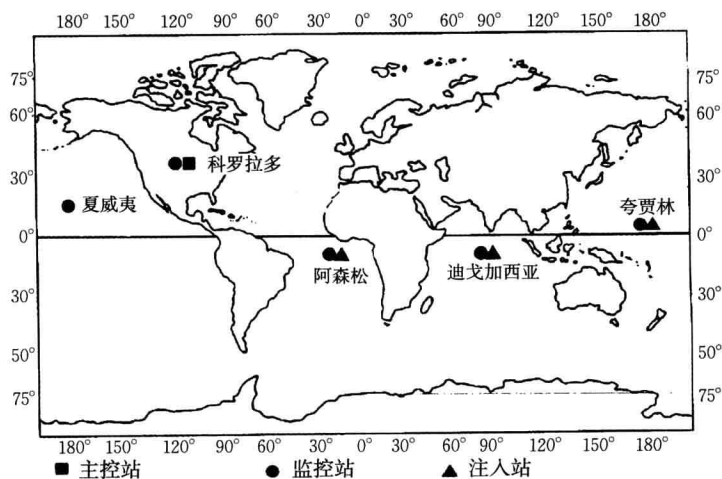


图 1-7 地面监控部分

主控站位于美国科罗拉多(Colorado)州的施里弗(Schriever)空军基地,它的作用是根据各监控站对 GPS 的观测数据,计算出卫星的星历和卫星钟的改正参数等,并将这些数据通过注入站注入到卫星中去。同时,它还对卫星进行控制,向卫星发布指令,当工作卫星出现故障时,调度备用卫星,替代失效的工作卫星工作。另外,主控站也具有监控站的功能。

监控站有 5 个,除了主控站外,其他 4 个分别位于夏威夷(Hawaii)、阿森松(Ascension)、迪戈加西亚(Diego Garcia)、夸贾林(Kwajalein),监控站的作用是接收卫星信号,监测卫星的工作状态。

注入站分别位于阿森松、迪戈加西亚、夸贾林,注入站的作用是将主控站计算出的卫星星历和卫星钟的改正数等注入到卫星中去。

### 1.2.3 用户设备部分

用户部分由 GPS 接收机、数据处理软件及相应的用户设备(如计算机、气象仪器等)组成。GPS 接收机采用码分多址(CDMA)技术,实现了接收机多通道接收卫星信号,提高系统的稳定性。用户部分的作用是接收 GPS 卫星所发出的信号,利用这些信号进行导航、定位等工作。

GPS 信号接收机的任务是捕获到一定卫星高度截止角所选择的待测卫星的信号并跟踪这些运行的卫星,对所接收到的 GPS 信号进行变换、放大和处理,以便测量出 GPS 信号从卫星到接收机天线的传播时间,解译出 GPS 卫星发送的导航电文,实时地计算出测站的三维位置,甚至三维速度和时间。

在静态定位中,GPS 接收机在捕获和跟踪 GPS 卫星的过程中其位置固定不变,接收机高精度地测量 GPS 信号的传播时间,利用 GPS 卫星在轨的已知位置,解算出接收机天线所在位置的三维坐标。而动态定位则是用 GPS 接收机测定一个运动物体的运行轨迹。此运动物体叫做载体。载体上的 GPS 接收机天线在跟踪 GPS 卫星的过程中相对地球而运动,接收机用 GPS 信号实时地测得运动载体的状态参数。

接收机硬件和机内软件以及 GPS 数据的后处理软件包,构成完整的 GPS 用户设备。GPS 接收机的结构分为天线单元和接收机单元两大部分。测地型接收机的天线和主机两个单元一般为两个独立的部件,观测时将天线单元安置在测站上,接收机单元位于测站附近的适当的地方,用电缆线将两者连接成一个整机,也有的将天线单元和接收单元制作成一个整体,观测时将其安置在测站上。

为便于观测,目前的各种类型的 GPS 接收机的体积越来越小,重量越来越轻。

## § 1.3 其他卫星定位系统简介

### 1.3.1 GLONASS

#### 1. 系统概况

GLONASS(Global Navigation Satellite System,全球导航卫星系统)是由苏联国防部独立研制和组建的第二代军用卫星导航系统,现由俄罗斯管理和维护。与美国的 GPS 相似,可为全球海、陆以及近地空间的各种军、民用户全天候、连续地提供高精度的三维位置、三维速度和时间信息。该系统从 1982 年 10 月 12 日发射第一颗 GLONASS 卫星(其外观如图 1-8 所

示)开始,到1996年1月18日,最终布满24颗(其中21颗工作星和3颗备份星)。

24颗星均匀地分布在3个近圆形的轨道平面上,这3个轨道平面两两相隔 $120^\circ$ ,每个轨道面有8颗卫星,同平面内的卫星之间相隔 $45^\circ$ ,轨道高度19 100 km,运行周期11 h 15 min,轨道倾角 $64.8^\circ$ 。

前些年,由于俄罗斯经济的衰退,GLONASS卫星没有及时得到补充。最近几年俄罗斯开始重视并密集发射。在2008年12月25日,俄罗斯军方使用一枚“质子-M”运载火箭将3颗GLONASS卫星送入预定轨道。2010年9月2日,同样使用“质子-M”运载火箭将3颗GLONASS-M(军用)卫星送入预定轨道,该系统在轨卫星数已达23颗,其中21颗正常工作,另外两颗处于备用状态,这意味着GLONASS系统可以为俄罗斯全境提供卫星导航服务。另外,2002年前俄联邦也启动了GLONASS现代化,即新一代的GLONASS-K卫星的研制工作,计划卫星设计寿命10年,星载原子钟精度达到 $10^{-14}$  s。为了便于和GPS兼容,GLONASS-K卫星除了使用原来的 $L_1$ 和 $L_2$ 频段频分多址信号外,还增加了码分多址的 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 信号。有理由相信,一个全新的GLONASS将与GPS展开全面竞争。

## 2. 主要特点

(1)GLONASS卫星的识别方法采用频分多址(FDMA), $L_1$ 频率为1.602~1.616 GHz,频道间隔为0.5625 MHz; $L_2$ 频率为1.246~1.256 GHz,频道间隔为0.4375 MHz。该方法较GPS的码分多址方法具有一定的抗干扰优势。

(2)GLONASS卫星上均装有激光反射镜,地面控制站组(GCS)对卫星进行激光测距,对测距数据作周期修正。

(3)GLONASS系统民用不带任何限制,不收费。

(4)民用的标准精度通道(CSA)精度数据为:在GLONASS-M(军用)卫星发射之前,该系统定位精度水平方向可达16 m,垂直方向25 m;随着新的GLONASS-M卫星的使用,GLONASS星座达到水平方向5 m、垂直方向9 m的定位精度,在信号最差的情况下,也可以达到水平方向12 m、垂直方向25 m的定位精度。测速精度0.01 m/s,授时精度为20~30 ns。

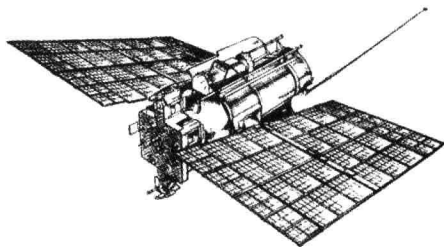


图1-8 GLONASS卫星外观

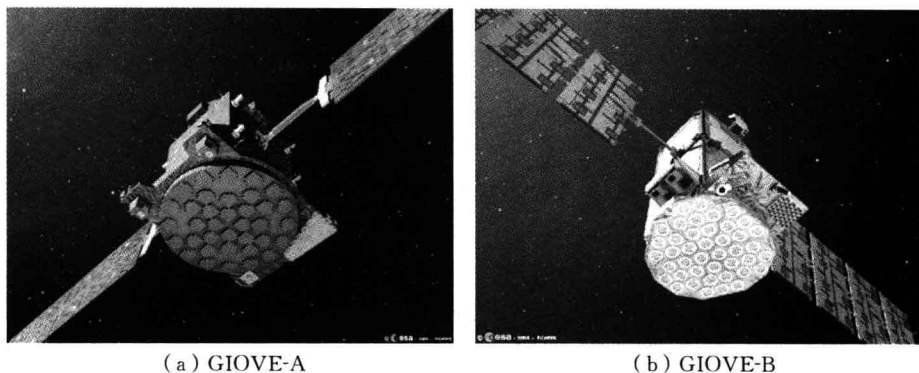
## 1.3.2 Galileo

### 1. 系统概况

Galileo(伽利略)系统是一个由欧洲独立自主运营的,由非军方控制的多模式全球卫星导航定位系统,同时是一个为用户提供高精度、高可靠性的开放管理的系统。欧盟于1999年首次公布伽利略卫星导航系统计划,2002年正式批准,2003年开始启动,其目的是摆脱欧洲对美国全球定位系统的依赖,打破其垄断。但由于各成员国存在分歧,原本2008年该系统投入使用的计划几经推迟,预计2014年投入运营。欧盟分别于2005年12月28日和2008年4月26日成功发射两颗试验卫星——GIOVE-A(Galileo In-Orbit Validation Elements)和GIOVE-B,对系统专用新导航信号等关键技术进行测试。其外观如图1-9所示。

Galileo系统计划由30颗卫星(27颗工作卫星和3颗备用卫星)组成。30颗卫星部署在3个中高度圆轨道面上,轨道高度23 616 km,星座对地面覆盖良好。在欧洲建立两个控制中心。





(a) GIOVE-A

(b) GIOVE-B

图 1-9 GIOVE 卫星外观

## 2. 主要特点

与 GPS、GLONASS 不同,该系统是完全从民用出发所建立的一个高精度、全开放型的新一代民用卫星导航定位系统;能与 GPS、GLONASS 有机地兼容,增强系统使用的安全性和完善性;建设资金 36 亿欧元,由欧洲各国政府和私营企业共同投资,我国也参加了该系统的建设。

### 1.3.3 北斗

#### 1. 系统概况

北斗系统(英文名称为 Compass Navigation Satellite System,简称 Compass)是根据我国著名科学家陈芳允院士 1985 年提出的建立我国卫星导航定位系统的建议而自主开发建立的全球导航定位系统。

1994 年国务院批准立项(称为北斗一号系统),经方案设计、卫星研制和发射,至 2003 年 12 月,系统正式运行。其间先后发射 3 颗“北斗导航试验卫星”(其中两颗试验卫星和 1 颗备用卫星)。由于该系统利用两颗卫星进行导航和定位,又称双星导航定位系统。目前正在建设的是北斗二号系统,2004 年国务院批准建设,以满足国家经济建设和国防建设对卫星导航的需求。自 2009 年进入组网发射阶段以来,进行了较密集的发射。截至 2010 年 11 月 1 日已有 6 颗卫星在轨运行,计划到 2020 年前建成一个独立自主、全球覆盖、稳定可靠的、具有多项世界先进水平的中国第二代卫星导航系统。

北斗系统由空间段、地面运控中心和应用系统组成。空间段包括 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星。地球静止轨道卫星分别位于东经 58.75°、80°、110.5°、140°和 160°。非静止轨道卫星由 27 颗中圆轨道和 3 颗倾斜同步轨道卫星组成。

北斗系统将提供开放服务和授权服务。开放服务为全球用户免费提供开放、稳定、可靠的基本定位、测速和授时服务,定位精度 10 m,测速精度 0.2 m/s,授时精度 20 ns。授权服务是为全球用户提供更高性能的定位、导航和授时服务,以及为亚太地区提供广域差分 and 短报文通信服务,广域差分定位精度为 1 m。

#### 2. 主要特点

北斗一号系统采用主动式双向测距二维导航原理。地面中心站通过两颗卫星向用户广播询问信号,根据用户响应的应答信号测量并计算出用户到两颗卫星的距离;然后根据地面中心站的数字地图,由中心站算出用户到地心的距离;再根据卫星 A、B 和地面中心站的已知地心