



全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

# GPS

# 测量技术

主编 贺英魁

煤炭工业出版社

内 容 要 点

# 全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

## GPS 测量技术

- 6 刘建南等. GPS 测量技术. 北京: 煤炭工业出版社, 2003
- 7 刘基余. GPS 卫星导航定位. 北京: 测绘出版社, 2003
- 8 宁津生等. 测绘学概论. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002
- 9 沈镜. 主编 贺英魁
- 10 施晖. 副主编 徐广翔 任建华
- 11 高成发. GPS 测量. 北京: 测绘出版社, 2002
- 12 李德仁. 主编 贺英魁. 卫星大地测量学. 北京: 测绘出版社, 2004
- 13 魏二虎, 黄劲松. GPS 测量操作与数据处理. 北京: 煤炭工业出版社, 2004
- 14 宁津生等. 现代大地测量理论与技术. 武汉: 武汉大学出版社, 2006
- 15 孔祥元等. 大地测量学基础. 武汉: 武汉大学出版社, 2003

I. G. II. ... III. 全球定位系统(GPS)-测量-  
IV. P528.4 煤炭工业出版社: 煤炭工业出版社

中国标准书号(CIP) 046244 号

煤炭工业出版社  
北京市朝阳区芍药居32号 100029  
网址: www.ccipr.com.cn  
北京中图印刷有限公司  
北京中图印刷有限公司

本册 787mm×1092mm<sup>1/16</sup> 印张 13<sup>1/2</sup>  
字数 324千字 印数 1—3,000  
2007年2月第1版 2007年2月第1次印刷  
社内编号 2898 定价 22.00元

煤炭工业出版社

本册责任编辑: 曹国良, 封面设计: 曹国良

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

本书是全国煤炭高职高专工程测量技术专业“十一五”规划教材。

全书共十一章,主要介绍了 GPS 的坐标系统和时间系统;GPS 卫星的坐标计算;电磁波传播和 GPS 卫星信号;绝对定位原理;GPS 测量的误差来源;相对定位和 RTK 测量原理;GPS 控制网的设计与外业工作和数据处理;GPS 接收机及数据处理软件。全书论述简明扼要、概念清晰,结构体系由浅入深、通俗易懂,重点介绍 GPS 测量的操作技术,应用性强。

本书是高职高专院校工程测量技术专业及其他相关专业的通用教材,也可作为中等专业学校工程测量技术专业教材,同时还可作为成人教育 GPS 培训教材和从事 GPS 测量工作的技术人员学习 GPS 测量技术的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

GPS 测量技术/贺英魁主编. —北京:煤炭工业出版社,  
2007.4

全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978—7—5020—3068—1

I. G… II. 贺… III. 全球定位系统(GPS)—测量—  
高等学校:技术学校—教材 IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 046244 号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)  
网址:www.cciph.com.cn  
北京京科印刷有限公司 印刷  
新华书店北京发行所 发行

开本 787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 13<sup>1</sup>/<sub>2</sub>  
字数 324 千字 印数 1—3,000  
2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷  
社内编号 5868 定价 25.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

全国煤炭高职高专  
工程测量技术专业“十一五”规划教材  
编审委员会

主任:纪奕君

副主任:薄志毅 李天和 索效荣 李战宏

秘书长:赵国忱

委员 (按姓氏笔画排列):

邓传军 冯大福 孙江 孙金礼

任建华 刘永清 刘俊荷 米志强

宋文斌 李世平 李孝文 杨楠

苗福林 贺英魁 钟来星 高绍伟

燕志明 姬婧 梁振华 董俊锋

温继满

# 前 言

20世纪70年代,由美国国防部建立的GPS全球定位系统,与传统的测量技术相比较,具有用途广、精度高、速度快、站间无需通视、操作简便、全天候作业、可提供三维坐标等特点。因而,当GPS建成以后,很快在全世界得到了非常广泛的应用。在工程测量领域,除地下工程测量以外的其他各种工程测量的传统测量技术,正在逐渐被GPS测量技术取代。其中,以GPS静态相对定位方法为手段的地面控制测量和以实时载波相位差分(RTK)定位方法为手段的施工测量、地形测量以及地籍测量等GPS测量技术的应用尤为广泛。因此,全国煤炭高职高专工程测量技术专业,为适应市场测量技术发展的需要,逐渐开设了GPS测量技术课程,作为工程测量技术专业的主干课程之一。

2006年5月,中国煤炭教育协会及中国矿业大学(北京)教材编审室共同组织召开了全国煤炭高等职业教育教材工作会议。会议指出:煤炭高等职业教育以为地方和煤炭行业经济发展服务为宗旨,以培养地方和煤炭行业经济发展所需的高等技术应用性人才为目标,培养下得去、留得住、用得上的技术和管理人才。现代高等职业教育教材建设应以市场人才需求为导向,实现从重理论、轻实践到理论与实践并重的转变;从以知识传授为主到以能力培养为主的转变。加强实践性教学环节,体现高等技术应用性人才的培养要求。

根据上述工作会议精神,为适应测量技术的发展和煤炭行业高等技术应用性人才培养的需要编写了《GPS测量技术》。全书内容培养目标明确,主次分明,通俗易懂。每章后有本章小结和习题,帮助学生学习和巩固本章内容。教学课时数以60学时为宜。

本书编写分工:重庆工程职业技术学院贺英魁编写第一章,长治职业技术学院任建华编写第二章、第三章,重庆工程职业技术学院罗强编写第四章、第六章,重庆工程职业技术学院李玲编写第五章、第七章,山西大同大学工学院徐广翔编写第八章、第九章、第十章、第十一章和附录。全书由贺英魁任主编,并定稿,由中国矿业大学(北京)崔希民教授主审。

因作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2007年1月26日

# 目 录

(87)	分封参其双器式概取	节二第
(97)	取取位宝枚参态取	节三第
(85)	取取位宝枚参态第	节四第
(84)	介筒词属已惠属 GPS	节正第
(87)		章小章本
(78)		属区言属参思
(88)	聊译其双那来基另的立宝 GPS	章六第
<b>第一章 概论</b>		(1)
(10) 第一节	GPS 的组成	(1)
(40) 第二节	美国政府的限制性政策	(6)
(60) 第三节	GPS 的重大发展	(7)
(97) 第四节	其他卫星定位系统	(8)
(101)	本章小结	(9)
(101)	思考题与习题	(9)
<b>第二章 GPS 定位的坐标系统和时间系统</b>		(10)
(50) 第一节	GPS 坐标系统的类型	(10)
(30) 第二节	天球坐标系	(11)
(10) 第三节	地球坐标系	(16)
(11) 第四节	大地测量基准及其转换	(23)
(110) 第五节	高程基准与常用大地水准面模型	(25)
(55) 第六节	时间系统	(27)
(53) 本章小结		(29)
(54) 思考题与习题		(30)
<b>第三章 卫星运动与 GPS 卫星的坐标计算</b>		(31)
(52) 第一节	卫星的无摄运动	(31)
(32) 第二节	卫星的受摄运动	(37)
(130) 第三节	GPS 卫星的星历	(39)
(141) 第四节	GPS 卫星的坐标计算	(41)
(141) 本章小结		(44)
(142) 思考题与习题		(44)
<b>第四章 电磁波的传播与 GPS 卫星信号</b>		(45)
(144) 第一节	电磁波传播的基本概念	(45)
(140) 第二节	大气层对电磁波传播的影响	(47)
(124) 第三节	GPS 卫星的测距码信号	(57)
(82) 第四节	GPS 卫星的导航电文	(69)
(141) 本章小结		(71)
(141) 思考题与习题		(72)
<b>第五章 GPS 定位的观测量与绝对定位原理</b>		(73)
(102) 第一节	GPS 定位的方法与观测量	(74)

第二节 观测方程及其线性化 .....	(78)
第三节 动态绝对定位原理 .....	(79)
第四节 静态绝对定位原理 .....	(82)
第五节 GPS 测速与测时简介 .....	(84)
本章小结 .....	(87)
思考题与习题 .....	(87)
<b>第六章 GPS 定位的误差来源及其影响</b> .....	(89)
(1) 第一节 与卫星有关的误差 .....	(89)
(1) 第二节 卫星信号的传播误差 .....	(91)
(2) 第三节 与接收设备有关的误差 .....	(94)
(7) 第四节 其他误差影响 .....	(96)
(8) 第五节 观测卫星的几何分布对绝对定位精度的影响 .....	(97)
(9) 本章小结 .....	(101)
(9) 思考题与习题 .....	(101)
<b>第七章 GPS 相对定位与差分定位</b> .....	(102)
(10) 第一节 概述 .....	(102)
(11) 第二节 静态相对定位原理 .....	(103)
(16) 第三节 动态相对定位原理 .....	(110)
(23) 第四节 差分定位原理 .....	(111)
(25) 第五节 整周模糊度与周跳 .....	(119)
(27) 本章小结 .....	(122)
(29) 思考题与习题 .....	(123)
<b>第八章 GPS 控制网的设计与外业工作</b> .....	(124)
(18) 第一节 GPS 网的构网特点与网形设计一般原则 .....	(124)
(18) 第二节 GPS 控制网的优化设计 .....	(127)
(27) 第三节 GPS 测量的外业工作 .....	(132)
(30) 第四节 GPS 观测成果检验与技术总结 .....	(139)
(41) 本章小结 .....	(141)
(44) 思考题与习题 .....	(141)
<b>第九章 GPS 测量数据处理</b> .....	(142)
(21) 第一节 概述 .....	(142)
(24) 第二节 GPS 基线向量的解算 .....	(144)
(27) 第三节 GPS 控制网的三维平差 .....	(149)
(27) 第四节 GPS 基线向量网的二维平差 .....	(154)
(29) 第五节 GPS 高程 .....	(158)
(37) 本章小结 .....	(164)
(37) 思考题与习题 .....	(164)
<b>第十章 GPS 接收机及数据处理软件</b> .....	(165)
(47) 第一节 GPS 接收机的分类 .....	(165)

---

第二节 GPS 接收机的组成 .....	(167)
第三节 几种常见的 GPS 接收机 .....	(170)
第四节 静态数据处理软件 .....	(172)
第五节 动态数据处理软件 .....	(175)
本章小结 .....	(179)
思考题与习题 .....	(179)
<b>第十一章 GPS 测量技术应用 .....</b>	<b>(180)</b>
第一节 GPS 在大地测量与地球动力学研究中的应用 .....	(180)
第二节 GPS 在灾害监测与预报中的应用 .....	(184)
第三节 GPS 在工程测量以及摄影测量与遥感技术中的应用 .....	(188)
第四节 GPS 定位技术在其他领域的应用 .....	(193)
本章小结 .....	(197)
思考题与习题 .....	(198)
<b>附录 .....</b>	<b>(199)</b>
附录 1 年积日计算表 .....	(199)
附录 2 GPS 点之记 .....	(200)
附录 3 GPS 点环视图 .....	(202)
附录 4 GPS 点标石类型与埋设要求 .....	(203)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(205)</b>



... 0.70 km ... 精度 ... 定位 ... 精度 ... 定位 ... 精度 ... 定位 ...

# 第一章 概论

## 第一节 GPS 的组成

1. GPS 的建立 (1) 1973-1979 年为概念设计阶段。美国、苏联、法国、日本、西德、加拿大、印度等国共同研究。其共同目标是：开发一种全球性的、高精度的、全天候的、连续工作的卫星导航系统。航海早先的导航是利用罗盘、灯塔等仪表或设施，结合天文现象进行的。20 世纪 20 年代，无线电信标问世，开创了陆基无线电导航的新纪元。但这种陆基无线电导航系统覆盖区域小，定位精度低(3.7 km~7.4 km)，难以适应现代航海的导航定位需要。

(2) 1980 年 1957 年 10 月 4 日，前苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星，使人类的活动范围延伸到了地球大气层以外。这颗卫星入轨运行后不久，美国霍普金斯大学应用物理实验室的韦芬巴赫(G. C. Weiffenbach)等学者，在地面已知坐标点位上，用自行研制的测量设备，捕获和跟踪到了前苏联卫星发送的无线电信号，并测得它的多普勒频移，进而解算出卫星轨道参数。依据这项实验成果，该实验室的麦克雷(F. T. McClure)等学者设想，若已知卫星轨道参数并测得卫星发送信号的多普勒频移，则可解算出地面点的坐标。这就是第一代卫星导航系统的基本工作原理。

1958 年 12 月，美国海军为了满足军用舰艇导航的需要，与霍普金斯大学应用物理实验室合作，开始研制卫星导航系统。因为这些卫星沿地球子午线运行，故称为子午卫星导航系统(TRANSIT)。1959 年 9 月开始发射试验性子午卫星，1963 年 12 月开始发射子午工作卫星并逐步形成由六颗工作卫星组成的子午卫星星座。从此揭开了星基无线电导航的历史新篇章。1967 年 7 月 29 日，美国政府宣布解密子午卫星所发送的导航电文的部分内容供民用。从此，大地测量由天文测量和三角测量时代进入到卫星大地测量时代。

利用卫星多普勒导航定位技术进行大地测量，与传统的三角测量相比较，具有“全球性”的特点。“千岛之国”的印度尼西亚，用常规的大地测量技术无法建立全国统一的大地测量控制网。但利用卫星多普勒定位技术在“千岛”之上共测设了 200 多个大地测量控制点，建成了全国统一的大地测量控制网。我国利用卫星多普勒定位技术进行了西沙群岛、南极长城站与大陆的连测。

前苏联在美国的诱发下，于 1965 年建立了类似的子午卫星导航系统，称为 CICADA。

子午卫星导航系统虽将导航和定位技术推向了一个新的发展时代，但相对于美国的军事需要而言，还有明显不足。其一是卫星少，不能连续导航定位。子午卫星导航系统一般有 5~6 颗工作卫星，在低纬度地区，地面上一点所见到的 2 次子午卫星通过的时间间隔约为 1.5 h，而子午卫星通过用户上空的持续时间为 10 min~18 min，所以不能连续定位。就大地测量而言，测站点上的观测时间长达 1 d~2 d，才能达到 0.5 m 的定位精

度。其二是轨道低,难以精密定轨。子午卫星平均飞行高度仅 1 070 km,地球引力场模型误差及空气阻力等因素影响导致卫星定轨误差较大。而卫星多普勒定位是以卫星作为动态已知点进行的,致使定位精度局限在米(m)级水平。其三是载波频率低,难以补偿电离层的影响。

为了突破子午卫星导航系统的应用局限性,满足美国军事部门对连续、实时、精密、三维导航和武器制导的需要,第二代卫星导航系统——GPS 全球定位系统便应运而生。

## 2. GPS 全球定位系统的建立

1973 年,美国国防部组织海陆空三军联合研究建立新一代卫星导航系统,称为全球定位系统(Global Positioning System),简称 GPS。其建立过程到目前为止经历了以下四个阶段。

(1) 1973~1979 年为概念构思分析测试阶段。这一阶段指出了 GPS 构成方案并验证其可行性。在此期间,美国发射了两颗概念验证卫星用于验证 GPS 原理可行性。另外还发射了一颗组网试验卫星,研制了三种类型的 GPS 接收机,建立了一处卫星地面控制设施并完成了大量的测试项目。

(2) 1980~1989 年为系统建设阶段。这一阶段完成的主要工作是发射了 11 颗组网试验卫星 Block II (其中一颗发射失败)和 1 颗工作卫星 Block II A,进一步完善了地面监控系统,发展了 GPS 接收机。1984 年测量领域成为第一个 GPS 商用用户领域。

(3) 1990~1999 年为系统建成并进入完全运作能力阶段。此间发射了多颗 Block II 和 Block II A 卫星,1993 年实现 24 颗在轨卫星满星座运行,满足民用的标准定位服务(100 m)的要求,1995 年实现了精密定位服务(10 m)。

(4) 2000~2030 年为 GPS 现代化更新阶段。1996 年美国由国防部和交通部组成了联合管理 GPS 事务局(IGEB),在 IGEB 的主持下于 1997~1998 年期间讨论了增加 GPS 民用信号,从而改进民用 GPS 状况,并与空军已经开始的计划相结合,形成了更新 GPS 运行要求的文献,并于 1999 年 1 月由美国副总统戈尔以“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。

## 二、GPS 组成概况

GPS 由空间卫星星座、地面监控系统和用户设备等三部分组成。

### 1. 空间卫星星座

GPS 空间卫星星座在 1993 年建成时由 24 颗卫星组成,目前有 30 颗工作卫星。这些卫星分布在 6 个轨道面上,如图 1-1 所示。这样分布的目的是为了保证在地球的任何地方可同时见到 4~12 颗卫星,从而使地球表面任何地点、任何时刻均能实现三维定位、测速和测时。GPS 卫星星座的主要特征见表 1-1。

GPS 卫星外观如图 1-2 所示。每颗卫星装有 4 台高精度原子钟,是卫星的核心设备。

GPS 卫星的功能是:

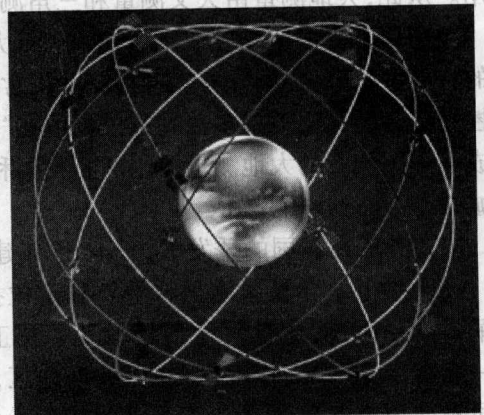


图 1-1 GPS 卫星星座

(1) 接收和存储由地面监控站发来的导航信

息,接收并执行监控站的控制指令;

表 1-1 GPS 卫星星座的主要特征

载波频率/GHz	1. 22 760、1. 57 542
卫星平均高度/km	20 200
卫星运行周期/min	718
轨道面倾角/(°)	55
轨道数	6

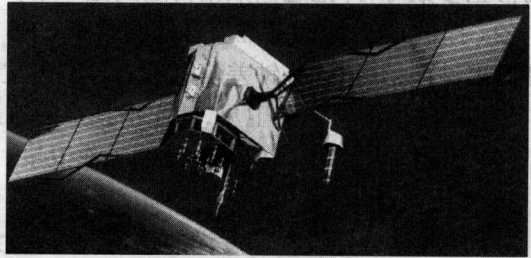


图 1-2 GPS 卫星(Block II)

- (2) 进行部分必要的数据处理;
- (3) 提供精密的时间标准;
- (4) 向用户发送定位信息。

2. 地面监控系统

为了监测 GPS 卫星的工作状态和测定 GPS 卫星运行轨道,为用户提供 GPS 卫星星历,必须建立 GPS 的地面监控系统。它由 5 个监测站、1 个主控站和 3 个注入站组成。如图 1-3 所示。

1) 监测站

监测站是在主控站控制下的数据自动采集中心。站内设有双频 GPS 接收机、高精度原子钟、计算机各 1 台,及若干台环境数据传感器。接收机对 GPS 卫星进行连续观测,以采集数据和监测卫星的工作状况;原子钟提供时间标准;环境数据传感器收集当地的气象数据。所有观测数据由计算机进行初步处理后送到主控站,用以确定 GPS 卫星的轨道参数。

5 个监测站分别位于太平洋的夏威夷、美国本土的科罗拉多州、大西洋的阿松森群岛、印度洋的迭哥伽西亚和太平洋的卡瓦加兰等,如图 1-3 所示。

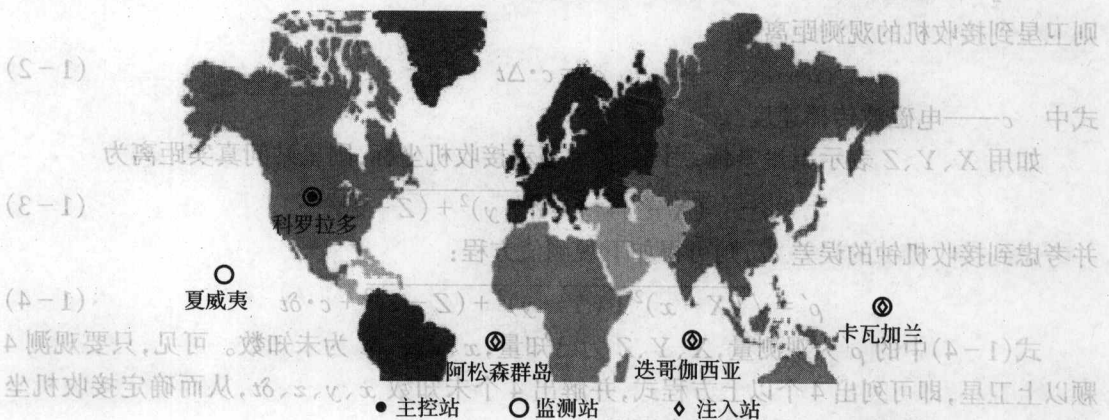


图 1-3 地面监控系统

2) 主控站

主控站位于美国本土的科罗拉多州,拥有以大型电子计算机为主体的数据收集、计算、传输和诊断等设备。其主要任务是:

- (1) 根据本站和其他监测站的所有观测资料,推算编制各卫星的星历、卫星钟差和大气层的修正参数等,并把这些数据传送到注入站;
- (2) 提供 GPS 时间基准。各监测站和 GPS 卫星的原子钟均应与主控站的原子钟同步,或者测出钟差,并把这些钟差信息编入导航电文,送到注入站;
- (3) 调整偏离轨道的卫星,使之沿预定的轨道运行;
- (4) 启用备用卫星以代替失效的工作卫星。

3) 注入站

3 个注入站分别设在印度洋的迭哥伽西亚、大西洋的阿松森群岛和太平洋的卡瓦加兰。注入站的主要设备包括 C 波段发射机、发射天线和计算机。其主要任务是在主控站的控制下,将主控站推算和编制的卫星星历、钟差、导航电文及控制指令注入到相应卫星的存储系统,并监测注入信息的正确性。

3. 用户设备

GPS 的空间卫星星座和地面监控系统是用户应用该系统进行定位的基础,用户要使用 GPS 全球定位系统进行导航或定位,必须使用 GPS 接收机接收 GPS 卫星发射的无线电信号,获得必要的定位信息和观测数据,并经过数据处理而完成定位工作。

用户设备主要包括 GPS 接收机、数据传输设备、数据处理软件和计算机。

三、GPS 定位的基本原理

定位是指测定点的空间位置。GPS 定位是将 GPS 卫星作为动态已知点。根据 GPS 卫星星历求得 GPS 卫星的已知坐标,由接收机测得卫星发射的无线电信号到达接收机的传播时间  $\Delta t$ ,即

$$\Delta t = t_2 - t_1 \tag{1-1}$$

式中  $t_1$ ——卫星发射定位信号时刻;

$t_2$ ——接收机接收到卫星定位信号的時刻。

则卫星到接收机的观测距离为

$$\rho' = c \cdot \Delta t \tag{1-2}$$

式中  $c$ ——电磁波传播速度。

如用  $X、Y、Z$  表示卫星坐标,用  $x、y、z$  表示接收机坐标,则星站间真实距离为

$$\rho = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2} \tag{1-3}$$

并考虑到接收机钟的误差  $\delta t$ ,则可得如下观测值方程:

$$\rho' = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2} + c \cdot \delta t \tag{1-4}$$

式(1-4)中的  $\rho'$  为观测量, $X、Y、Z$  为已知量, $x、y、z、\delta t$  为未知数。可见,只要观测 4 颗以上卫星,即可列出 4 个以上方程式,并解出 4 个未知数  $x、y、z、\delta t$ ,从而确定接收机坐标  $x、y、z$ 。这就是 GPS 定位的基本原理。

四、GPS 定位的特点与问题

1. GPS 定位的特点

由上述可知,GPS 定位是以绕地球运行的 GPS 卫星作为动态已知点,以根据电磁波传播时间求得的星站距离作为观测量,进而求得接收机的坐标。因此,GPS 定位与传统的测量方法相比较,具有以下特点:

1) 定位精度高

随着 GPS 接收机和数据处理软件性能的不提高, GPS 定位的精度远远超过了传统测量方法的精度。如用载波相位观测量进行静态相对定位, 在小于 50 km 的基线上精度可达  $1 \times 10^{-6}$ , 在 100 km ~ 500 km 的基线上精度为  $0.1 \times 10^{-6}$ , 在大于 1 000 km 的基线上精度可达  $0.01 \times 10^{-6}$ 。

2) 观测时间短

目前采用静态相对定位, 观测 20 km 以内基线仅需 15 min ~ 20 min。采用 RTK 定位, 每站只需几秒钟的时间。

3) 测站间无需通视

用传统的测量方法测定点位, 要求测站间必须通视, 迫使测量人员将点位选在能满足通视要求而在工程建设中使用价值不大的制高点上。GPS 定位是由卫星距离确定点位的, 只需测量点与空间的卫星通视即可。这样, 测量人员就可以将测量点位选在工程建设最需要的位置。

4) 仪器操作简便

目前, 用于静态相对定位的 GPS 接收机, 开机后就能自动观测。观测时测量人员的工作是将接收机在点位上进行对中整平, 量取天线高, 观察接收机的工作状态即可, 操作十分简便。

5) 全天候作业

除打雷闪电不宜作业外, 其他天气均可进行野外测量工作。

6) 提供三维坐标

传统测量方法是将平面测量与高程测量分开进行的, 而 GPS 测量可同时测得点的三维坐标。

7) 可全球布网

只要在地面上两点能同时观测到相同的 4 颗以上卫星, 便可求得两点在同一坐标系中的坐标增量。因此, 在世界范围内, 各大州及岛屿均可连网。

8) 应用广泛

GPS 导航定位技术的应用领域十分广泛, 主要应用于以下各领域:

- (1) 陆海空运动目标导航;
- (2) 测绘: 包括大地测量及控制测量、地形地籍测量、工程施工测量、海洋测绘、航空摄影测量;
- (3) 交通管理;
- (4) 卫星发射及其运行轨道监测;
- (5) 地震监测与地壳变形监测;
- (6) 城市规划;
- (7) 气象预报;
- (8) 农业、林业;
- (9) 旅游业;
- (10) 资源调查;
- (11) 工程施工。

GPS 应用将在第十一章中作较详细地介绍。本书将围绕控制测量和工程测量介绍 GPS 测量原理与方法。

### 2. GPS 存在的问题

- (1) 军用的国家安全及保密要求与民用精度要求相互冲突;
- (2) 对民用用户无安全承诺;
- (3) 三维测量精度不一致。

大量实践表明,用 GPS 测量所得点位坐标,其三维精度不一致,其中,高程误差最大, $x$  坐标误差次之, $y$  坐标误差最小。

## 第二节 美国政府的限制性政策

美国建立 GPS 全球定位系统的目的是用于美国军事目的的各种飞行器和运载器的实时导航。

为了防止非经美国特许的用户利用 GPS 导航定位技术对美国的自身安全构成威胁,保障美国国家的利益和安全,对非经美国政府特许的 GPS 用户实行了限制性政策。

### 一、对不同的 GPS 用户,提供不同的服务方式

GPS 卫星发射的无线电信号,含有两种不同精度的测距码,即保密的高精度的 P 码和公开的低精度的 C/A 码。与此相对应, GPS 提供的定位方式也分为两种,即精密定位服务 (Precise Positioning Service - PPS) 和标准定位服务 (Standard Positioning Service - SPS)。

精密定位服务 (PPS),可提供  $L_1$  和  $L_2$  载波上的 P 码,  $L_1$  载波上的 C/A 码,导航电文和消除 SA 影响的密匙。PPS 的服务对象是美国军事部门和其他经美国特许的用户。这类用户可利用 P 码获得高精度的观测量,且能通过卫星发射的  $L_1$  和  $L_2$  两种频率的信号测量来消除电离层折射的影响。PPS 单点定位的精度为 5 m, 1995 年提高到 1 m。

标准定位服务 (SPS) 仅提供  $L_1$  载波上的 C/A 码和导航电文,其服务对象是广大的民用用户。这类用户只能利用 C/A 码获得低精度的观测量,且只能采用调制在  $L_1$  载波上的 C/A 码测量距离,无法利用双频技术消除电离层折射的影响。其单点定位的精度为 30 m。

### 二、实施选择可用性 (SA) 政策

为了进一步降低标准定位服务 (SPS) 的定位精度,美国对 GPS 卫星播发的信号实行了 SA 政策,进行人为干扰。这种干扰是通过  $\delta$  技术和  $\epsilon$  技术实现的。 $\delta$  技术是对 GPS 的基准信号人为地引入一个高频抖动信号,从而使载波、测距码和数据码频率受到干扰,降低星站距离测量精度。 $\epsilon$  技术干扰卫星星历数据,使得利用 C/A 码星历进行单点实时定位的精度降低。

在 SA 的影响下,单点实时定位的精度降低到 100 m。2000 年 5 月 1 日取消了 SA 政策。

### 三、反电子诱骗 (A-S) 技术

当 P 码已被解密,或在战时,敌对方如果知道了特许用户接收机所接收卫星信号的频率和相位,便可发射适当频率的干扰信号,诱使特许用户的接收机错锁信号,产生错误的导航信息。为了防止这种诱骗,美国采用了反诱骗 (anti-spoofing) 技术对 P 码进一步保密。即通过 P 码与保密的 W 码进行模二相加,将 P 码转换成 Y 码。美国特许用户可从接收到的 Y 码中剔除 W 码而得到 P 码,非特许用户因无法得到 W 码而不能得到 P 码。

### 第三节 GPS 的重大发展

自从 1973 年美国开始研制 GPS 以来,已经过了 30 多年。在这期间,由于美国国内外形势变化和广大用户应用研究,GPS 系统性能、应用领域及定位精度均发生了巨大变化。

#### 一、美国对 GPS 的政策调整与技术改进

GPS 的最初设计目的是为了美国军事用途的各种飞行器和运载器的实时导航,但为了经济利益,美国也对民用的 GPS 标准定位服务进行了初步规划设计。在研制过程中逐步发现了民用与军用的相互冲突,主要是精码被解密、民用精度过高以及精码必须借助粗码来捕获等问题。因此,美国于 1986 年前后就考虑 A-S 和 SA 技术,1990 年开始采用该项技术来限制民用。1995 年以后,由于美国国内就业压力和国际竞争的原因,美国政府又着手 GPS 现代化的研究,以彻底解决军用与民用的相互冲突问题并提高民用精度。1999 年 1 月美国副总统戈尔发布了“GPS 现代化”通告,2000 年 5 月 1 日取消 SA 政策。2004 年 GPS 工作卫星数达到 30 颗。这些政策使得目前民用 GPS 定位精度大幅度提高。

#### 2. 技术改进及 GPS 现代化的内容

1) 增加卫星数  
GPS 的设计工作卫星数为 21 颗,基本上能保证地球表面 98% 的地区能同时观测到 4 颗以上 GPS 卫星,但在定位时往往因卫星在空间的分布不合理而导致定位精度较低,而且有少数死角不能观测到 4 颗以上卫星。为此美国将工作卫星数增加到 30 颗,以确保全球覆盖的连续实时定位。

#### 2) 卫星钟稳定度的提高

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,其稳定度可达  $10^{-15}$ 。此外,卫星的设计使用寿命也从 7.5 年延长到 15 年。

#### 3) GPS 现代化

GPS 现代化的主要目的:保护战区内的美方军用;防止敌方开拓 GPS 军用;保护战区外的 GPS 民用。GPS 现代化的内容如下:

(1) 在 2005 年发射的 Block II R-M 卫星的  $L_2$  载波上增加 C/A 码,使 GPS 民用用户实现实时的电离层折射改正。在  $L_1$ 、 $L_2$  载波上增加军用 M 码。此外,该卫星还能够进行 GPS 卫星间的距离测量和星间在轨数据通信,实现不依赖于地面注入站的星历数据及星钟改正数据的自主更新。

(2) 在 2006 年发射的 Block II F 卫星上增加民用的  $L_5$  载波,使测地用户能够实现伪距和载波相位测量的无电离层折射影响的组合解算。使动态定位的用户获得厘米(cm)级的实时点位精度。该卫星还可增强军用信号强度,以提高抗干扰能力。

(3) 在 2012 年以后发射的 GPS III 卫星上增加其他特殊功能。

#### 二、GPS 应用技术的重大发展

在 20 多年的 GPS 民用期间,广大民用用户经过潜心研究和不断开拓,使 GPS 应用技术取得了长足进展。主要有以下几个方面:

(1) 通过国际 GPS 大会战,建立了全球 GPS 大地网,使各国对本国以往的大地网得以检验,并获得本国坐标系与美国 WGS-84 坐标系之间进行坐标转换的精确参数。

(2) 各个国家、城市、部门以及 GPS 用户接收机开发商纷纷建立地面监测站,获得了高精度的 GPS 后处理星历。

(3) GPS 民用用户通过对 GPS 卫星广播的卫星钟差改正进行内插等方法,使 GPS 实时单点定位的精度达到了 0.1 m。

(4) 各城市及地区纷纷建立区域(似)大地水准面模型,精确求得了大地水准面与参考椭球面间的差距(亚 dm 级),使 GPS 测高可代替水准测量。

(5) 抗强电磁干扰、抗遮挡的 GPS 接收机已普及,使 GPS 的应用条件限制大大放宽。

(6) GPS/GLONASS 兼容机广泛应用,使得用户可在天空被大面积遮挡的情况下获取足够数量的观测数据。

### 第四节 其他卫星定位系统

前苏联于 1965 年开始建立卫星全球定位系统。第一代全球卫星定位系统 CICADA,与美国的 TRANSIT 类似。自 1982 年 10 月开始,前苏联总结了 CICADA 的优劣,吸取了美国 GPS 的成功经验,着手建立自己的第二代卫星全球定位系统,称为 Global Orbiting Navigation Satellite System,简称 GLONASS。于 1995 年建成由 24 颗卫星组成的 GLONASS 工作卫星星座(卫星数 24)。

GLONASS 与 GPS 相比较,除表 1-2 中所列差别之外,另一个重要的差别是每颗 GLONASS 卫星采用不同的载波频率。此外,GLONASS 卫星的作业寿命比较短,仅为 22 个月。

2002 年 3 月 24 日,欧盟首脑会议冲破美国政府的再三干扰,终于批准了建设 Galileo 卫星导航定位系统的实施计划。该系统计划由 30 颗卫星组成。于 2005 年 12 月 28 日发射了第一颗试验卫星。预计于 2008 年底建成并投入运行。Galileo 卫星星座的主要特点见表 1-3。

表 1-2 GLONASS 卫星星座的主要特征

卫星平均高度/km	19 100
卫星运行周期/min	676
轨道面倾角/(°)	64.8
轨道数	3

表 1-3 Galileo 卫星星座的主要特征

卫星平均高度/km	23 616
卫星运行周期/min	844
轨道面倾角/(°)	56
轨道数	3

Galileo 卫星导航定位系统是民用导航定位系统,不存在军用与民用的冲突问题,同时还必须对用户安全负责。此外,其卫星运行高度高于 GPS 卫星,因而覆盖率较高,导航定位精度将优于 GPS 全球定位系统。

北斗卫星定位系统是由中国自主开发的主动式卫星定位系统,于 2000 年 10 月 31 日发射第一颗北斗卫星到 2003 年 5 月 24 日为止,建成了第一代由三颗地球同步卫星构成的导航星座,可用于我国境内及周边地区的导航定位。具有全球导航定位功能的第二代北斗卫



星导航系统处于研制阶段。

## 本章小结

本章介绍了 GPS 全球定位系统的组成、美国政府的限制性政策、近年来 GPS 的发展和其他全球定位系统。目的是使读者通过本章的学习,对 GPS 有一个初步的、概括性的认识。读者应重点掌握 GPS 的组成、GPS 测量的基本原理、GPS 的特点与问题以及美国的限制性政策。

本章的教学要求是:

(1) 掌握 GPS 全球定位系统的组成部分;

(2) 理解 GPS 测量的基本原理;

(3) 理解 GPS 测量的特点与存在的问题;

(4) 了解美国政府的限制性政策;

(5) 了解 GPS 的发展情况;

(6) 了解其他全球定位系统。

在本章学习过程中遇到不理解的术语(静态相对定位等),可查阅后续章节,亦可暂时搁置,学完后续章节自然能够理解。

## 思考题与习题

1-1 GPS 由哪些部分组成?各部分起何作用?

1-2 GPS 测量是怎样确定点位的?

1-3 与经典测量方法相比较,GPS 测量有什么特点?存在哪些问题?

1-4 标准定位服务和精密定位服务各有哪些服务内容?

1-5 简述 SA 政策和 A-S 措施。

1-6 美国政府对 GPS 作过哪些政策调整和技术改进?

1-7 GPS 测量技术的应用近年来有哪些重大发展?

1-8 GPS 有哪些重要的应用领域?