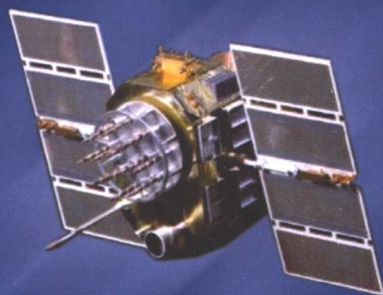


全国水利水电类高职高专统编教材

# GPS定位原理与技术

周建郑 主编



黄河水利出版社

全国水利水电类高职高专统编教材

# GPS 定位原理与技术

主 编 周建邦

副主编 纪 勇 聂琳娟 赵 杰

黄河水利出版社

## 内 容 提 要

本书是全国水利水电类高职高专统编教材,是依据全国水利水电高职教研会和全国测绘行业教学指导委员会制定的工程测量专业《GPS定位原理与技术》课程教学大纲编写完成的。全书共分10章,主要内容有:绪论;GPS定位的坐标系统和时间系统;GPS定位系统与GPS信号;GPS定位的基本原理;GPS定位误差的来源及其影响;GPS定位测量的设计与实施;GPS控制网的数据处理;GPS实时动态定位原理;GPS接收机的选择和使用;GPS在国民经济建设中的应用等。

本书主要供高职高专院校工程测量、矿山测量、水利水电工程、摄影测量、土地管理、工程地质等专业教学使用,也可作为从事以上专业的工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

GPS定位原理与技术/周建郑主编. —郑州:黄河水利出版社,2005.7

全国水利水电类高职高专统编教材

ISBN 7-80621-933-1

I. G… II. 周… III. 全球定位系统(GPS) - 高等学校:技术学校 - 教学 IV. P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第067492号

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路11号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940 传真:0371-66022620

E-mail:yrp@public.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:16.5

字数:380千字

印数:1—4 100

版次:2005年7月第1版

印次:2005年7月第1次印刷

---

书号:ISBN 7-80621-933-1/P·43

定价:26.00元

# 前 言

本书是根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》等文件精神,以及由全国水利水电高职教研会拟定的教材编写规划,报水利部批准,用中央财政安排的“支持示范性职业技术学院建设”项目经费组织编写的水利水电类全国统编教材。

全球卫星定位系统是美国从 20 世纪 70 年代开始研制的,历时 20 年,耗资 200 多亿美元,于 1994 年全面建成,具有在海、陆、空进行全方位实时三维导航与定位能力的新一代卫星导航与定位系统。GPS 以全天候、高精度、自动化、高效益等显著特点,成功地应用于大地测量、工程测量、航空摄影测量、地壳运动监测、工程变形监测、资源勘察、地球运动力学等多种学科,从而给测绘领域带来一场深刻的技术革命。目前已遍及国民经济各个部门,并开始逐步深入人们的日常生活。它是 20 世纪最重大的科技成就之一,是学生学习专业知识、专门技术及获取新知识能力的重要课程,同时也是学生将来生活、工作实践中的一个重要工具。该课程的主要任务是:讲授 GPS 卫星定位的基本原理,GPS 卫星定位的误差来源及其影响,GPS 卫星定位的设计与实施,GPS 卫星定位的数据处理,培养学生使用 GPS 接收机在各种大、中型工程勘测、大地控制网、施工控制网和工程的施工放样中进行定位工作的能力,对培养学生的专业和岗位能力具有重要的作用。

为使本教材具有较强的实用性和通用性,突出“以能力为本位”的指导思想,编写时力求做到基本概念准确,各部分内容紧扣培养目标,文字简练、相互协调、通顺易懂,减少不必要的重复,以利于学生学习,提高学生解决工程中实际问题的能力。

在编写这本教材时,我们力求体现高职教育的特点,力求满足高职教育培养技术应用型人才的要求,力求内容精练、突出应用、加强实践。为了体现教材的特色,我们对传统的教材内容体系作了适当的调整,希望调整后的体系能更适合高职教学的要求。

根据高等职业教育理论与实践并重、理论课课时较少的情况,本书内容按“必需、够用”的原则安排。

本教材主要是为了满足工程测量、摄影测量、地理信息系统、地籍测量与土地管理、水利水电工程、农业水利技术、工程监理、水文水资源、道路与桥梁、工业与民用建筑、工程地质、水文地质、给水排水等专业的高职高专院校教学使用,也能适应其他相关专业教学及岗位培训的需要,并可供从事以上专业的技术人员参考。

本教材编写人员及分工如下:黄河水利职业技术学院赵杰(第一章,第十章)、纪勇(第二章,第四章第一、二节),湖北水利水电职业技术学院聂琳娟(第三章),华北水利水电学院水利职业学院刘世祥(第四章第三、四节,第五章第一~三节),黄河水利职业技术学院周建郑(第五章第四、五节,第六章),山西水利职业技术学院杜玉柱(第七章),杨凌职业技术学院赵飞燕(第八章),广西水利电力职业技术学院陆鹏(第九章)。周建郑任主编,纪勇、聂琳娟、赵杰任副主编。全书由周建郑统稿。在本书编写过程中,得到了黄河水利出

版社和编写者所在单位的大力支持,在此一并致谢。

武汉大学测绘学院博士丁仕俊教授审阅了本教材,提出了宝贵的修改意见,在此表示诚挚的感谢。

限于编者的水平、时间及经验,书中定有欠妥之处,敬请专家和读者批评指正。

**编 者**

2004 年 10 月

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 绪 论</b> .....	(1)
第一节 卫星大地测量及其发展.....	(1)
第二节 GPS 全球卫星定位系统及其星座 .....	(4)
第三节 GLONASS 全球卫星定位系统 .....	(8)
第四节 Galileo 全球卫星导航定位系统 .....	(12)
第五节 我国的北斗导航卫星定位系统 .....	(14)
第六节 GPS 航天飞机测图系统 .....	(18)
第七节 美国的 GPS 政策与我国的 GPS 卫星跟踪网 .....	(20)
第八节 我国的 A、B 级 GPS 大地控制网 .....	(22)
思考题与习题 .....	(24)
<b>第二章 GPS 定位的坐标系统和时间系统</b> .....	(26)
第一节 参心坐标系 .....	(26)
第二节 地心坐标系 .....	(32)
第三节 天球坐标系 .....	(35)
第四节 时间系统 .....	(38)
思考题与习题 .....	(43)
<b>第三章 GPS 定位系统与 GPS 信号</b> .....	(44)
第一节 GPS 定位系统的组成 .....	(44)
第二节 卫星的运行及其轨道 .....	(52)
第三节 卫星星历与卫星位置计算 .....	(57)
第四节 GPS 卫星信号 .....	(61)
第五节 GPS 信号的接收 .....	(70)
思考题与习题 .....	(75)
<b>第四章 GPS 定位的基本原理</b> .....	(77)
第一节 GPS 定位概述 .....	(77)
第二节 伪距法定位 .....	(82)
第三节 载波相位测量 .....	(87)
第四节 GPS 动态定位原理 .....	(93)
思考题与习题 .....	(99)
<b>第五章 GPS 定位误差的来源及其影响</b> .....	(100)
第一节 GPS 测量的主要误差分类 .....	(100)
第二节 与卫星有关的误差.....	(101)

第三节	卫星信号传播误差	(104)
第四节	接收设备误差与图形强度	(112)
第五节	整周跳变分析与整周未知数的确定	(114)
	思考题与习题	(118)
<b>第六章</b>	<b>GPS 定位测量的设计与实施</b>	<b>(119)</b>
第一节	建立 GPS 控制网的技术依据	(119)
第二节	GPS 定位网的布设	(124)
第三节	GPS 定位网的测设方案	(130)
第四节	外业观测	(135)
第五节	观测成果的外业检核及处理	(140)
	思考题与习题	(144)
<b>第七章</b>	<b>GPS 控制网的数据处理</b>	<b>(145)</b>
第一节	观测数据的预处理	(145)
第二节	GPS 基线向量的解算	(150)
第三节	GPS 基线向量网独立平差	(156)
第四节	坐标系统的转换	(159)
第五节	GPS 网与地面网的三维平差	(165)
第六节	GPS 网与地面网的二维平差	(173)
第七节	GPS 的高程计算	(180)
	思考题与习题	(183)
<b>第八章</b>	<b>GPS 实时动态定位原理</b>	<b>(184)</b>
第一节	RTK 概述	(184)
第二节	RTK 系统基准站的组成和作用	(185)
第三节	RTK 流动站的组成和作用	(187)
第四节	RTK 定位测量的外业准备工作	(188)
第五节	RTK 的作业方法	(189)
第六节	GPS 网络 RTK 技术	(196)
	思考题与习题	(199)
<b>第九章</b>	<b>GPS 接收机的选择和使用</b>	<b>(200)</b>
第一节	测地型接收机的类型选择	(200)
第二节	测地型 GPS 信号接收机简介	(204)
第三节	导航型 GPS 信号接收机	(215)
	思考题与习题	(225)
<b>第十章</b>	<b>GPS 在国民经济建设中的应用</b>	<b>(226)</b>
第一节	GPS 在大地测量中的应用	(226)
第二节	GPS 在工程测量中的应用	(227)
第三节	GPS 在航空摄影测量中的应用	(228)
第四节	GPS 在线路勘测及隧道贯通测量中的应用	(229)

第五节 GPS 在地形、地籍及房地产测量中的应用 .....	(230)
第六节 GPS 在水下地形测量中的应用 .....	(231)
第七节 GPS 在其他领域中的应用 .....	(231)
思考题与习题.....	(232)
<b>附录 1 X 市 GPS 三等平面控制网测量技术设计示例 .....</b>	<b>(233)</b>
<b>附录 2 Trimble Geomatics Office (TGO)软件的使用 .....</b>	<b>(238)</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>(255)</b>



# 第一章 绪 论

1957年10月4日,世界上第一颗人造地球卫星发射成功,标志着人类进入了空间技术的新时代。近50年来,由于卫星测量的发展,特别是GPS全球卫星定位系统的成功建立和应用,测绘行业经历了一场深刻的技术革命。无论是在定位精度、使用条件、应用范围,还是在经费节省、人力物力的减少等方面都产生了巨大的飞跃和进步,因此世界各国竞相研究并相继使用这种技术和方法。本章主要介绍卫星大地测量的发展和GPS定位的有关情况以及世界上有关国家研制新的全球卫星定位系统的情况。

## 第一节 卫星大地测量及其发展

### 一、大地测量的发展概况

大地测量的发展,大体上可分为古代大地测量、经典大地测量和现代大地测量三个阶段。

古代大地测量要追溯到两千多年前,为了兴修水利和研究地球的形状和大小,古埃及和我国的夏禹就开始进行区划、距离和高低的测量。1615年荷兰人斯涅尔(Snell)首创三角测量法进行弧度测量。总之,从人们确认地球是个圆球并测量它的大小算起,到18世纪中叶以前为止。在这一阶段中,许多科学家为证明地球是个圆球并测定其大小做出了艰辛的努力,有的甚至为此付出了生命。

从18世纪中叶牛顿(Newton)、克莱劳(Clairaut)建立了地球为扁球的理论并用几何和物理的方法测定其形状和大小,到20世纪中叶莫洛琴斯基在斯托克斯理论的基础上建立现代地球形状理论基础为止的这200年时间为经典大地测量阶段。在这一阶段中,其主要任务是为测量地形图服务。为了提高点位测量的精度和速度,人们在测量方法、测量仪器、椭球计算和数据处理等方面做了大量的研究工作,并取得了丰硕的成果。这些成果现在仍被广泛应用:

(1)三角测量法。17世纪初望远镜应用于天象观测,是测绘科学发展史上一次较大的变革。以后望远镜普遍应用于各种测量仪器,1617年三角测量方法开始应用,到1668年已有放大倍率为40倍的望远镜出现,并且成倍地提高了测量成果的精度。

(2)最小二乘法。德国数学家、物理学家、天文学家高斯(Carl Friedrich Gauss, 1777~1855年)于1794年提出了最小二乘法理论,其基本理论是:若观测值 $L_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )与对应函数值 $Y_i = f(x_i)$ 的差值为 $V_i = Y_i - L_i$ ,相应的权为 $P_i$ ,则在 $[PVV] = P_1 V_1^2 + P_2 V_2^2 + \dots + P_n V_n^2$ 为最小的条件下解算未知数 $x_i$ 的方法称为最小二乘法。

(3)重力测量。重力测量就是根据不同的目的和要求使用重力仪测定地面点重力加速度的技术和方法。按照分类方法的不同,有各类重力测量;按使用仪器与测量方法分有

相对重力测量和绝对重力测量;按用途分有大地重力测量和勘探重力测量;按精度分有高精度重力测量和一般重力测量等。

2003年12月3日,国家测绘局宣布停止使用国家1985重力基本网成果,决定启用2000国家重力基本网成果。2000国家重力基本网由21个基准点、126个基本点和112个基本点引点共计259个重力控制点组成;覆盖范围涵盖我国大陆、香港特别行政区、澳门特别行政区及部分海域;全网实际精度为 $\pm 10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ,其中基准点精度为 $\pm 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

在新中国成立初期,为了满足经济建设和国防建设的需要,从1951年开始野外工作到1971年,在全国范围内布设了近8万km包括120多个锁环的一等三角锁,在锁环中间填设二等全面三角网,在青藏高原大部分地区布设了电磁波测距导线。布设的国家天文大地网,其建网原则是:①分级布网、逐级控制;②应有足够的精度;③应有足够的密度;④应有统一的规格。国家天文大地网是从我国的国情出发逐步实施的,至今仍在发挥其作用。

现代大地测量阶段从20世纪中期开始,是在电子技术和空间技术迅猛发展的推动下形成的。电磁波测距、全站仪、电子计算机改变了经典测量中全靠测角的低精度状况,将测量成果精度提高到 $10^{-6}$ 量级以上;并缩短了作业周期,且使过去无法实现的严密理论计算得以实行;特别是人造卫星和空间技术的发展,突破了经典大地测量在点位、时间、应用、精度等方面的局限性,使测量产生了划时代的飞跃和质的变革。

现代大地测量的主要任务是研究和解决地面点的几何定位、地球重力场的测定、点位和重力场的变化等问题,具体包括:

- (1)建立与维护国家、地区及全球的大地网,并研究其变化;
- (2)测量并研究地极移动、地壳运动、潮汐等地球动力现象;
- (3)测定地球重力场及其变化。

随着人造地球卫星的发射成功,迅速发展的人造地球卫星技术在空间技术、地球科学、地球动力学、天文学、大地测量、资源勘察、气象、导航、遥感、通讯、军事科学等众多学科领域得到了广泛应用。特别是在海湾战争、阿富汗战争和波黑战争中,除了显示现代武器和现代其他科学技术的巨大优越性以外,同时还显示了现代导航和定位技术在军事上所发挥的巨大作用。

## 二、卫星大地测量的起源

卫星大地测量是大地测量的新分支,就是利用卫星信息实现大地测量的目的,其作用分为如下几方面:

- (1)精确测定地面点地心(质心)坐标系内的坐标,从而能够将全球大地网连成整体,建成全球统一的大地测量坐标系统。
- (2)精确测量地球的大小和形状、地球外部引力场、地极运动、大陆板块间的相对运动以及大地水准面的形状,为大地测量和其他科学技术服务。
- (3)广泛地应用于空中和海上导航、地质矿产勘探及军事等方面。

卫星大地测量初期(1962~1965年),美国斯密森天体物理天文台(SAO)曾用光学摄

影法进行了全球性的卫星测量,对北美 NAD、欧洲 EUA、澳大利亚 AND、日本 JAD、阿根廷 ARG、夏威夷 HAW 等大地系统进行了联测,利用 39 个站的观测资料计算并发布了“标准地球 II”。1966~1971 年间又用更多的观测站进行了观测,当时的方向观测精度为  $\pm(0.3\sim 1.5)''$ ,点位中误差为  $\pm 6.7\text{ m}$ ,地心坐标中误差为  $\pm(17\sim 32)\text{ m}$ 。可见其精度是有限的,且观测条件受限制,底片处理也很复杂,所以以后就较少应用。

与此同时,激光测距法伴随出现,即在地面测站上用激光测距仪对卫星进行测距,以达到定轨定位的目的,测距精度可达到厘米级,但用这种定位要有四个站组成较好的图形,实行同步观测,这对大面积布网来说是很困难的,因此未能普及。

由于前述两种方法的精度和使用条件受到限制,人们便采用无线电技术,即利用卫星发射的无线电波进行距离测量。美国詹斯·霍普金斯(Johns Hopkins)大学应用物理实验室(APL)的韦芬巴赫(G. C. Weiffenbach)和基尔(W. H. Guier)等学者,用自制测量设备测量并计算出苏联第一颗卫星的轨道参数,根据这项试验成果,该实验室的麦克雷(F. T. Meclure)等学者,设想了一个方案:若已知在轨卫星的轨道参数,地面上的观测者又测得该颗卫星发送信号的多普勒频移,则可计算出观测者的点位坐标。该设想即成为第一代卫星导航定位系统的基本工作原理。1958 年 12 月,美国詹斯·霍普金斯大学应用物理实验室在美国海军的资助下,开始进行美国海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System——NNSS)的研制,这种方法具有全天候等优点,因而发展很快,卫星多普勒定位就是在这一时期发展起来的。

美国海军导航卫星系统是美国第一代卫星导航系统,由于该系统卫星轨道都通过地球南北极构成的子午面,故也称“子午(Transit)卫星导航系统”,其使用的卫星接收机称为多普勒接收机。该系统于 1964 年建成,1967 年 7 月 29 日,美国政府宣布,解密子午卫星导航电文部分内容,提供民用,它的投入使用,充分显示了利用人造地球卫星进行导航定位的优越性。该系统由三部分(即空间部分、地面监控部分和用户部分)组成。其空间部分由 6 颗高约 1 070 km 的卫星组成,分布在 6 个轨道平面内,每个轨道平面相对于地球赤道的倾角约为  $90^\circ$ ,轨道近于圆形,运行周期约 107 min,对于同一颗子午卫星,每天通过次数最多为 13 次。卫星播发 400 MHz 和 150 MHz 两种频率的载波供用户和监测站接收。其中,在 400 MHz 载波中用导航电文向用户提供卫星星历和时间等信息,便于用户解算位置。地面监控部分由卫星跟踪站、计算中心和注入站组成,其作用是将跟踪观测卫星的结果输入计算中心,计算卫星在相应时刻的轨道参数,再由注入站以导航电文的形式将这些参数和其他有关内容注入卫星存储器,供卫星按时提供给用户。用户部分即用户接收机接收卫星信号、测量多普勒频移,结合导航电文计算卫星与接收机间的距离,据此解算出接收机(用户)的位置。

由于该系统不受气象条件的影响,自动化程度较高,且具有良好的定位精度,所以它的出现也立即引起大地测量学者的极大关注。尤其在该系统提供民用之后,在大地测量方面,进行了大量的应用研究和实践,并取得了许多令人瞩目的成就。如在美洲大陆及其附近测设了大约 500 个多普勒点;西欧各国在 1976 年 5 月和 1977 年 4 月分别进行了两次多普勒会战(EDOC—1,2),在 16 个国家测设了 30 多个多普勒点,后者参加了欧洲三角网的重新平差;法国地理院不仅在本国建立了多普勒网,而且还为阿尔及利亚、利比亚、

圭亚那和加蓬等国家测设了 116 个多普勒点;素称千岛之国的印度尼西亚,测设了 200 多个多普勒控制点,从而使常规大地测量技术无法统一的国家大地控制网建成了统一的坐标系。20 世纪 70 年代中期,我国有关测绘和勘察单位开始引进多普勒接收机,不仅测设了全国卫星多普勒大地网,而且还实现了大陆和西沙群岛的大地测量基准联测,石油和地质勘探部门也在我国西北地区测量了卫星多普勒定位网。1984 年 12 月至 1985 年 2 月,在我国南极长城站上,用 MX1502 型卫星多普勒接收机进行卫星多普勒定位测量,共观测了 210 次子午卫星通过,精确地测定了设在南极乔治岛上长城站的地理位置:南纬  $62^{\circ}12'59.811'' \pm 0.015''$ ,西经  $58^{\circ}57'52.665'' \pm 0.119''$ ,高程为  $43.58 \text{ m} \pm 0.67 \text{ m}$ ,南极长城站至北京的距离为  $17\,501\,949.51 \text{ m}$ 。

在美国子午卫星导航系统建立的同时,苏联海军也于 1965 年开始建立了一个卫星导航系统,叫做 CICADA,它与 NNSS 系统相类似。该系统有 12 颗卫星,构成了 CICADA 卫星星座。其轨道高度约为  $1\,000 \text{ km}$ ,卫星沿轨道运行的周期约为  $105 \text{ min}$ ,卫星质量约为  $700 \text{ kg}$ ,卫星播发  $400 \text{ MHz}$  和  $150 \text{ MHz}$  两种频率的导航定位信号, $150 \text{ MHz}$  的载波频率用来传送导航电文, $400 \text{ MHz}$  的载波频率用于削弱电离层效应的影响。

卫星多普勒定位虽然有很多优点,但因子午卫星的轨道平面与地球赤道的倾角约为  $90^{\circ}$ ,所以子午卫星几乎是在地球子午面内运行的,经度与接收机高程相关,只有高程已知时才能解出经度和纬度,可见 NNSS 系统只能提供二维导航解,且是单星多普勒法,须卫星运行一个时间段后才能获得一次导航解,精度也只优于  $40 \text{ m}$ 。又由于卫星较低,覆盖面积小,星数又少,须相隔  $0.8 \sim 1.6 \text{ h}$  才能进行一次定位,可见子午卫星导航系统虽显示了导航的优越性,但又存在着精度低、不能实时导航和只能供二维导航解等缺陷。这些缺陷是由子午卫星导航系统的“单星、低轨、测速”体制决定的。从大地测量学方面来看,由于它定位速度慢(一个测站一般平均观测  $1 \sim 2$  天),精度也较低(单点定位精度  $3 \sim 5 \text{ m}$ ,相对定位精度为  $0.5 \sim 1 \text{ m}$ ),所以该系统在大地测量和地球动力学研究方面的应用也受到了很大的限制。为了实现全天候、全球性和高精度的连续导航与定位,第二代的卫星导航系统——GPS 卫星全球定位系统便应运而生。卫星定位技术发展到了一个辉煌的历史阶段,使测量定位技术产生了质的改变。

## 第二节 GPS 全球卫星定位系统及其星座

1973 年 12 月,为了满足全球战略的需要,美国国防部组织陆海空三军十多个单位共同组成联合计划办公室。在联合计划办公室的领导下,吸取其空军提出的“621—B”计划和海军提出的“TIMATION”计划的优点,共同研制了 Navigation by Satellite Timing And Ranging/Global Positioning System(缩写成 NAVSTAR/GPS),即导航卫星测时和测距/全球定位系统,简称 GPS 定位系统,或直接简写为 GPS。

为了管理 GPS 定位系统,美国国防部将联合计划办公室设在洛杉矶的空军航天处司令部内,其组成人员包括美国陆军、海军、海军陆战队、国防部制图局、交通部、北大西洋公约组织和澳大利亚的代表。自 1974 年以来,GPS 计划已经历了方案论证(1974~1978 年)、系统论证(1979~1987 年)、生产试验(1988~1993 年)三个阶段。1978 年 2 月 22

日,第一颗 GPS 试验卫星发射成功。论证阶段共发射 11 颗 BLOCK I 的试验卫星(它们于 1993 年 12 月 31 日全部停止工作);11 年后,即 1989 年 2 月 14 日发射第一颗工作卫星,到 1994 年 3 月 28 日为止共发射 35 颗 GPS 卫星。此时的 GPS 卫星星座的信号覆盖率已达到 98%。1994 年 4 月 24 日美国国防部宣布:“GPS 系统已具备初步运作能力。”整个 GPS 系统经过一年的调试和检验后,美国国防部于 1995 年 4 月 27 日又宣布:“GPS 系统已具备全部运作能力。”意即在全世界任何地方、任何时候均实现了全天候导航、定位和定时。1994 年底,美国国防部宣布:“从 1995 年 1 月起,将在 GPS 卫星导航电文的空域补充新信息,使 GPS 的实时定位精度达到 1 m。”这在理论和技术上是一重大突破。随着 GPS 的投入使用,NNSS 于 1996 年 12 月停止使用。GPS 卫星的发射情况见表 1-1。

表 1-1 GPS 卫星的发射情况

顺序	卫星类型	卫星数量(颗)	发射年份	用途
第一代	BLOCK I	11	1978~1985	试验
第二代	BLOCK II、II A	9、15	1989~1996	正式工作
第三代	BLOCK II R、II F	33	1997~2010	改进 GPS 系统
第四代	BLOCK III	未知	2010	增强 GPS 系统

注:BLOCK II A(A=Advanced), II R(R=Replacement), II F(F=Follow on)。

历时 23 年、总投资 300 亿美元的“GPS 计划”终于完成,真正成为名副其实的“全球定位系统”。这是卫星大地测量史上的里程碑,也是测绘历史上的一次深远的技术革命。

GPS 工作卫星(BLOCK II / II A)的外形如图 1-1 所示,卫星发射进入轨道后,星体两侧各伸展由 4 叶拼成的太阳能电池翼板,总面积为  $7.2 \text{ m}^2$ 。两侧翼板能自动对太阳定向,给 3 组 15 A 的镉镍蓄电池不断充电,保证了卫星在地影区也能正常工作。GPS 工作卫星的主体呈圆柱形,直径为 1.5 m,整体在轨质量为 843.68 kg,比试验卫星增重了 45%,它的设计寿命为 7.5 年,事实上均能超过该设计寿命而正常工作。GPS 卫星采用的是螺旋形天线阵列和圆极化式发送射电信号,12 根螺旋形天线组成了天线阵列,其发射波束的张角大约为  $30^\circ$ ,可以覆盖卫星的可见地面。除了上述部分以外,卫星还包括入轨动力、反作用控制、姿态和速度控制系统、遥测和指令系统以及导航信号发送系统等。卫星姿态是采用三轴稳定方式,由四个斜装惯性轮和喷气控制装置构成三轴稳定系统,使螺旋天线阵列所辐射的波束对准卫星的可见地面。

GPS 系统主要是为美国海陆空三军服务的,它具有广泛的军事用途。例如,为地面部队迅速行动指明方位,为核潜艇导航,为弹道导弹导航,检测全球核爆炸,摄取全球性的军事情报,反潜艇,反导弹等。因此,GPS 卫星的内部设备复杂而繁多。例如,为了战略部队的应急通讯,美国在 GPS 卫星

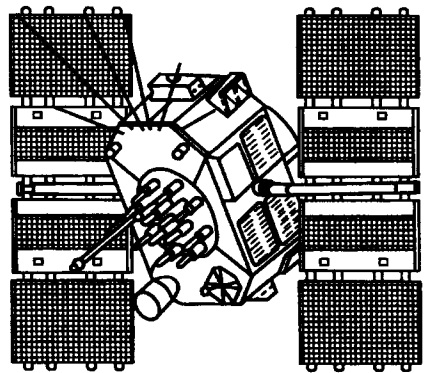


图 1-1 GPS 工作卫星

上安装战略通信机,其质量达  $16.03 \text{ kg}$ ,体积为  $0.0124 \text{ m}^3$ ,采用  $240 \sim 272 \text{ MHz}$ 、 $318 \sim$

400 MHz 和 7 900~8 000 MHz 的微波信号,发射功率为 20 W。

GPS 定位是一种被动定位,必须建立高稳定的频率标准。因此,每颗卫星上都必须安装高精度的时钟。当有  $1 \times 10^{-9}$  s 的时间误差时,将引起 30 cm 的距离误差。试验表明,一般原子钟能够提供高稳定的频率。氢原子频率标准的稳定性最好,在 100 s 至 1 d 的时间内,氢原子频率标准的稳定优于  $1 \times 10^{-14}$  s,比石英晶体频率标准要高出两个数量级以上。所以在每一个 GPS 工作卫星中,一般都要设置两台铷原子钟和两台铯原子钟,并计划将来采用氢原子钟。虽然 GPS 卫星发送几种不同频率的信号,但都来自同一个基准频率 10.23 MHz。所以只须启用一台原子钟,其余的作为备用,以备更替出现故障的时钟。

在 1988~1994 年间所建成的全球定位系统,包括 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星,它们所组成的 GPS 卫星星座如图 1-2 所示。24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内,每个轨道面内有 4 颗卫星运行,卫星距地面的平均高度为 20 200 km。6 个轨道面相对于地球赤道面的倾角为  $55^\circ$ ,各轨道面之间的交角为  $60^\circ$ ,运行速度为 3 800 m/s,每颗卫星可覆盖全球 38% 面积。当地球自转  $360^\circ$  时,卫星绕地球运行两圈,环绕地球运行一圈的时间为 11 h 58 min。地面的观测者每天可提前 4 min 见到同一颗卫星,从地平线升起至没落,用户可见到卫星的时间约为 5 h。这样,观测者在地球表面上任何地点任何时刻,在卫星高度角  $15^\circ$  以上,平均可同时观测到 6 颗卫星,最多可观测到 11 颗卫星,用以测定它的实时点位和其他状态参数。例如,在我国北纬  $34^\circ 48'$ 、东经  $114^\circ 28'$ ,一天内能够看到的 GPS 卫星数,全天有 50% 的时间,能够看到 7 颗 GPS 卫星;有 30% 的时间,能够看到 6 颗 GPS 卫星;有 15% 的时间,能够看到 8 颗 GPS 卫星;有 5% 的时间,能够看到 5 颗 GPS 卫星。这表明,在我国境内全天能够见到 5~8 颗 GPS 卫星,利于我国用户进行连续不断的导航定位测量。

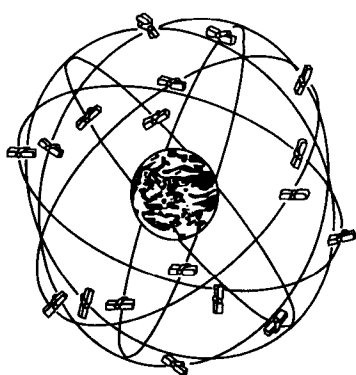


图 1-2 GPS 卫星星座

2000 年 5 月 1 日,美国政府取消了限制民用精度的“SA”政策,仅在局部或个别卫星上实施“SA”技术。

如表 1-2 所示,截至 2004 年 8 月,目前 GPS 在轨工作卫星为 29 颗,其中 17 号卫星在 2003 年 6 月 6 日至 7 月 23 日期间列为不健康状况,7 月 9 日其星钟从 Cs 4 转为 Rb2,卫星移到 D 6 星位上又开始正常运行。现在工作的卫星编号从 1 号至 31 号之间,只有 2 号、12 号、32 号为空缺。29 颗卫星中有 3 颗为 BLOCK II 卫星,17 颗为 BLOCK II A 卫星,9 颗为 BLOCK II R 卫星,正在用铯原子钟(Cs)运行的有 9 颗卫星,其余均用铷原子钟(Rb),在 1993 年 11 月 22 日启用的卫星达 15 颗,即工作差不多十年以上的卫星数目过半数,最早的一颗卫星还是 1989 年 6 月发射的。原先 21 号卫星是 1990 年 8 月 2 日发射的,2002 年 9 月 25 日出现异常情况,于 2003 年 1 月 27 日宣布退出服务,现已为 2003 年 3 月 31 日发射的卫星所接替,后者在 4 月 12 日投入正式服务,其间不过 2 周,是件异乎寻常的行为,主要原因是为适应当时正在进行的伊拉克战争的急需。

表 1-2 现有 GPS 卫星在轨情况

序号	卫星序列号 (PRN)	卫星时钟 (CLOCK)	轨道面(Plane)						
			A	B	C	D	E	F	
1	1	铯钟(Cs)							4
2	3	铯钟(Cs)			2				
3	4	铷钟(Rb)				4			
4	5	铯钟(Cs)		4					
5	6	铷钟(Rb)			1				
6	7	铷钟(Rb)			4				
7	8	铯钟(Cs)	3						
8	9	铯钟(Cs)	1						
9	10	铯钟(Cs)						3	
10	11	铷钟(Rb)				2			
11	13	铷钟(Rb)							3
12	14	铷钟(Rb)							1
13	15	铯钟(Cs)				5			
14	16	铷钟(Rb)		1					
15	17	铷钟(Rb)				6			
16	18	铷钟(Rb)						4	
17	19	铷钟(Rb)			3				
18	20	铷钟(Rb)						1	
19	21	铷钟(Rb)				3			
20	22	铷钟(Rb)						2	
21	23	铷钟(Rb)							6
22	24	铯钟(Cs)				1			
23	25	铯钟(Cs)	2						
24	26	铷钟(Rb)							2
25	27	铷钟(Rb)	4						
26	28	铷钟(Rb)		3					
27	29	铷钟(Rb)							5
28	30	铷钟(Rb)		2					
29	31	铷钟(Rb)			5				

注:资料截至 2004 年 8 月 7 日。

GPS 全球定位系统可满足各种不同用户的需要,从根本上解决了人类可在地球的任何位置进行导航和定位的问题。在海上,可用于海上协同作战、海洋交通管理、石油勘探、海洋捕鱼、浮标建立、管道铺设、暗礁定位、海港领航等方面;在空中,可用于飞机导航、飞机会合、空中加油、武器投掷和空中交通管理等;在陆地上,可用于各种部队的定位、各种军事设施和其他设施的定位等;在空间技术方面,可用于导弹、飞船、飞机的导航和定位等;在人们的生活中,如汽车、旅游、摄影、探险、狩猎、捕鱼、农业生产等都可方便地使用。

近期,美国为了进一步改善 GPS 的可用性、安全性和完善性,实时推出了 GPS 现代化的计划,即实施广域增强系统和局域增强系统;进一步提高民用精度,先在 GPS 卫星上提供了第一个民用频率 1 575.42 MHz,2003 年提供了第二个民用频率 1 227.60 MHz,

2006年前增加第三个民用频率 1 176.45 MHz,并提高码频率和发射功率,其目的是为了和其他全球定位系统争夺市场。第四代 GPS 卫星——BLOCK III 正在研制中,预计 2010 年发射第一颗卫星,BLOCK III 卫星除了具有现有 GPS 卫星的全部功能以外,旨在提高目标定位精度和大大增强抗干扰能力,目标定位精度要求达到:水平精度 0.5 m,垂直精度 1 m。另外还在军事、矿藏、城市规划等方面有所增强。

综上所述,GPS 导航定位系统的特点如下:

(1)定位精度高。应用实践证明,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 以上可达  $10^{-9}$ 。在 300~1 500 m 的工程精密定位中,1 h 以上观测的解其平面位置误差小于 1 mm,与 ME-5000 电磁波测距仪测定的边长比较,其边长较差最大为 0.5 mm,较差中误差为 0.3 mm。

(2)观测时间短。随着 GPS 系统的不断完善,软件的不断更新,目前 20 km 以内的相对静态定位,仅需 15~20 min;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,流动站观测时间只需 1~2 min;动态相对定位测量时,流动站出发时观测 1~2 min,然后可随时定位,每站观测仅需几秒钟。

(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。由于无须点间通视,点位位置根据需要可稀可密,使选点工作甚为灵活,也可省去经典大地网中的传算点、过渡点的测量工作。

(4)可提供三维坐标。经典大地测量将平面与高程采用不同方法分别施测。GPS 可同时精确测定测站点的三维坐标。目前,GPS 水准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,自动化程度越来越高;接收机的体积越来越小,质量越来越轻,极大地减轻了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愉快。

(6)全天候作业。目前,GPS 观测可在一天内的任何时间进行,不受阴天黑夜、起雾刮风、下雨下雪等气候的影响。但雷雨天气不要进行 GPS 观测,要注意防雷电。

(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。其应用领域不断扩大。

### 第三节 GLONASS 全球卫星定位系统

GLONASS 全球卫星导航系统的起步晚于 GPS 9 年。在广泛使用 GPS 的同时,苏联在全面总结 CICADA 第一代卫星导航系统优缺点的基础上,吸取美国 GPS 系统的成功经验,从 1982 年 10 月 12 日开始,逐步建立了第二代卫星导航系统——GLONASS 全球卫星导航系统(Global Orbiting Navigation Satellite System)。该系统原计划在 1995 年 12 月 14 日建成由 (21+3) 颗卫星组成的 GLONASS 工作卫星星座,其中 21 颗卫星为工作卫星,3 颗为在轨备用卫星,它们均匀地分布在如图 1-3 所示的三个轨道平面内,并以 1.602~1.616 GHz 和 1.246~1.256 GHz 射电频率发射信号和传播电文。可见,GLONASS 系统与美国的 GPS 系统极为相似。期间遭遇了苏联解体,由俄罗斯接替,1995 年初只有 16 颗 GLONASS 卫星在轨工作,1995 年进行了三次成功发射,将 9 颗卫星送入轨道,完成了



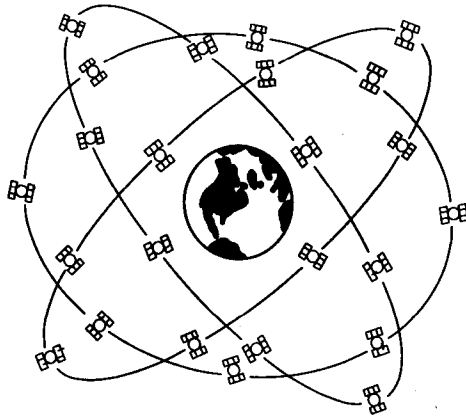


图 1-3 GLONASS 卫星星座

24颗工作卫星加一颗备用卫星的布局。经过数据加载、调整和检验,整个系统已于1996年1月18日正常运行。该系统采用PZ-90坐标系,如表1-3所示。

表 1-3 PZ-90 与 WGS-84 坐标系的椭球参数

参数名称	PZ-90 椭球	WGS-84 椭球
椭球长半轴 $a$	6 378 136 m	6 378 137 m
椭球扁率 $f$	1/298.257	1/298.257 223 563
地球引力常数(含大气层) $GM$	$398\,600.44 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2$	$398\,600.5 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2$
地球自转角速度 $\omega$	$72.921\,15 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$	$72.921\,15 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$
二阶带谐系数 $J_2$	$1\,082.62 \times 10^{-6}$	$1\,082.62 \times 10^{-6}$

图 1-4 为 GLONASS 卫星的外形结构,星体直径为 2.25 m,展开的太阳能电池翼板的宽度为 7.23 m,可产生 1.6 kW 的电力;磁强仪拉杆的长度为 7.84 m,卫星在轨质量为 1 400 kg。GLONASS 卫星采用频分多址的信号识别方式,每颗 GLONASS 卫星采用不同的射电频率,如第  $j$  颗 GLONASS 卫星的射电频率为:

$$f_{j1} = f_1 + (j - 1)\Delta f_1$$

$$f_{j2} = f_2 + (j - 1)\Delta f_2$$

式中  $f_1 = 1\,602.562\,5 \text{ MHz}$ ;  $\Delta f_1 = 0.562\,5 \text{ MHz}$ ;

$f_2 = 1\,246.437\,5 \text{ MHz}$ ;  $\Delta f_2 = 0.437\,5 \text{ MHz}$ ;

$j = 0, 1, 2, 3, \dots, 24$ (其中 0 号卫星为做试验之用)。

因使用频率过多,国际无线电咨询委员会提出异议,要求俄罗斯压缩 GLONASS 卫星所用的载波频段,让出高端频率。2005 年以后,GLONASS 卫星将采用下述载波频率:

$$L_1: 1\,598.062\,5 \sim 1\,604.250\,0 \text{ MHz}$$

$$L_2: 1\,242.937\,5 \sim 1\,247.750\,0 \text{ MHz}$$