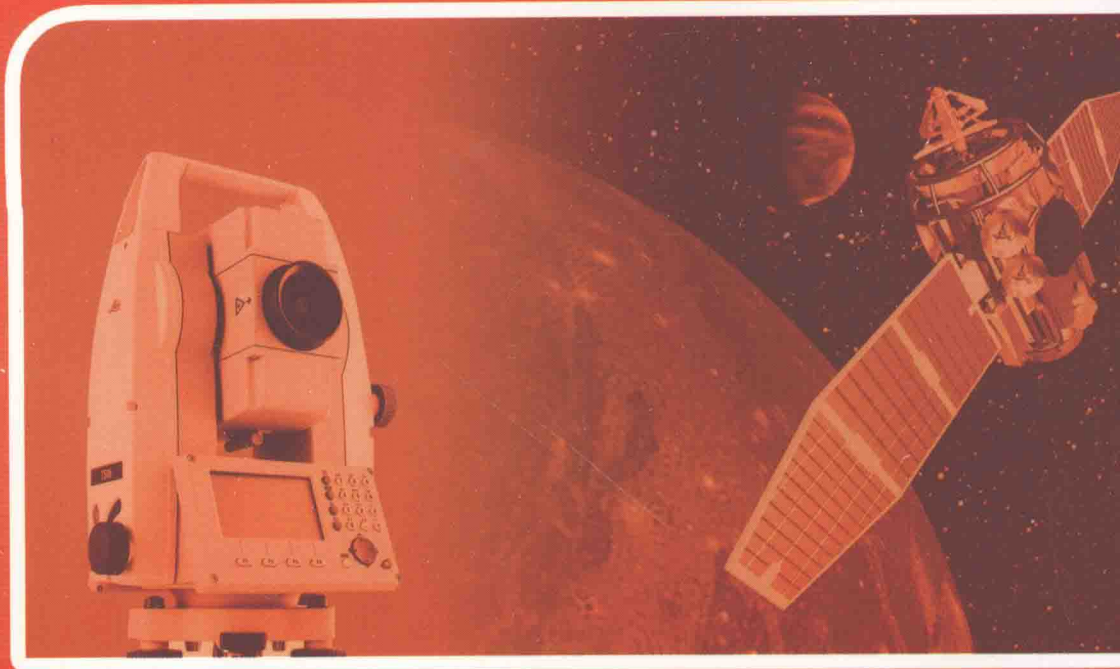




全国高职高专工程测量技术专业规划教材



GPS测量技术

GPS CELIANG JISHU

第2版

王勇智 主编
翟 翊 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



全国高职高专工程测量技术专业规划教材

GPS测量技术

GPS CELIANG JISHU

第2版

主 编	王勇智	
副主编	郝海森	高永芹
	杜玉柱	左美蓉
主 审	翟 翊	



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

全书共 9 章：第 1~3 章主要介绍了 GPS 测量的基础知识；第 4 章和第 5 章介绍了 GPS 测量的基本原理和测量误差；第 6 章和第 7 章介绍了 GPS 测量的设计与实施和 GPS 测量数据处理；第 8 章介绍了常规 RTK 技术的应用；第 9 章介绍了 GPS 测量技术的发展趋向——网络 RTK 技术的应用。

本书主要供高职高专工程测量技术、地理信息系统、摄影测量、地籍测量与土地管理等测绘类专业教学使用，也可以作为水利水电工程、工程监理、道路与桥梁、房屋建筑技术、市政工程技术、施工技术与工程、水文与水资源等相关专业的教材，还可作为测量工程技术人员的自学教材或参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

GPS 测量技术 / 王勇智主编. —2 版. 北京：中国电力出版社，2011.7
全国高职高专工程测量技术专业规划教材
ISBN 978-7-5123-1960-8

I. ①G… II. ①王… III. ①全球定位系统-测量-高等职业教育-教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 150693 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：王晓蕾 责任印制：蔺义舟 责任校对：李 亚

北京丰源印刷厂印刷·各地新华书店经售

2007 年 8 月第 1 版 2012 年 1 月第 2 版·第 6 次印刷

787mm×1092mm 1/16·11.5 印张·278 千字

定价：29.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

《GPS 测量技术》自 2007 年出版以来，已重印多次，被全国 30 余所高职高专院校选用，受到了广大师生和测绘工程技术人员的好评，取得了良好的社会效益。

近年来，卫星导航定位技术得到进一步的发展完善，以网络 RTK 为代表的新技术、新方法的应用正在全国迅速普及。为了适应新的形势，进一步完善提高教材的高职特色，并且配合河北工程技术高等专科学校工程测量技术示范专业建设，故对 2007 年版教材进行修订。修改后的教材在保持原有内容要点和风格特色的基础上，增加了较多的新技术、新内容，并对保留内容进行了修改和完善。在尽量维持原有章节结构的前提下，做了以下修改：

第一章，进一步完善了我国北斗卫星导航系统（Compass）的介绍。第二章，补充了 2000 国家大地坐标系的内容。第三章，加强了卫星定位的相关概念，删减了卫星位置计算内容，着重强调了接收卫星信号测距的原理介绍。第四章，删减了部分理论公式。第六章，按照 2009 年国家质量监督局颁发的 GB/T 18314—2009《全球定位系统（GPS）测量规范》和 GB 50026—2007《工程测量规范》的新内容、新标准、新要求进行了全面的改写。第七章，删掉了部分公式，并按新规范改写了相关内容。第八章，增补了常规 RTK 的应用介绍，将网络 RTK 内容并入第九章。第九章，用网络 RTK 替换了原有内容，详细介绍了网络 RTK 的概念、应用和实例，同时介绍了用我国南方测绘公司的接收机接入南方 CORS 网络的方法，还简介了 SABS 技术。

本教材配有相关课件，可以与中国电力出版社编辑联系索取。

本教材由王勇智担任主编，郝海森、高永芹、杜玉柱、左美蓉任副主编。编写人员及分工如下：王勇智编写第 1 章和第 6 章；张丽军编写第 2 章；杜玉柱编写第 3 章；聂琳娟编写第 4 章；郝海森、左美蓉编写第 5 章；高永芹编写第 7 章；王学军、孙艳崇编写第 8 章；吴亮清、张新盈编写第 9 章。全书由王勇智统稿。

解放军信息工程大学测绘学院翟翊教授审阅了本教材，并提出了宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中欠妥之处，敬请各位专家、同行和读者指正，我们的联系邮箱是：hbgzwyz@163.com。

编者

2011 年 6 月

第 1 版前言

本教材是根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》的文件精神，按照全国高职工程测量技术专业通用教材编写（武汉）会议规划，组织全国 15 所高职院校编写的全国高职高专工程测量技术专业规划教材之一。

自 20 世纪 70 年代以来，以美国全球定位系统（GPS）为代表的全球卫星导航定位系统（GNPSS），以其全球性、全天候、高精度、高效益的特点，已成功地应用于气象、遥感、通信、导航、地球科学、地球动力学、天文学、大地测量、工程测量、资源勘察、灾情预报、紧急救援、环境监测以及军事科学诸多领域，广泛地影响着 21 世纪人类生活的各个方面。特别是网络 RTK 的发展，使得 GPS 的应用满足了高速度且高精度的要求。

由美国、俄罗斯、欧盟均不惜巨资建立自己的全球卫星导航定位系统的情况可见，该系统对于一个国家在政治、经济以及军事方面的重要意义。我国也在建立自己的北斗一号导航定位系统，目前已有 5 颗在轨实验卫星，并将逐步发展为全球性的卫星导航定位系统。

可以预言，随着科学技术的发展，全球卫星导航定位技术必将与移动通信技术、互联网技术一道成为影响 21 世纪人类生活的三大技术。

本教材具有较强的实用性和通用性，着力体现高职教育的特点，力求满足高职教育培养高级“岗位”型人才的要求，强调应用，加强实践。突出“以能力为本位”、“必需够用”的指导思想，编写中力求做到基本概念准确、内容精练、文字简练、通顺易懂，以利于学生学习，培养学生解决工程中实际问题的能力。

本教材主要是满足高职工程测量技术、地理信息系统、摄影测量、地籍测量与土地管理等测绘类专业的教学需要，也可以作为水利水电工程、工程监理、道路与桥梁、工业与民用建筑、市政工程技术、施工技术与管理、水文与水资源等专业的教材使用，也可供相关工程技术人员作为自学教材或参考书使用。

本教材由王勇智担任主编，郝海森、牛志宏、杜玉柱、左美蓉任副主编。编写人员及分工如下：河北工程技术高等专科学校王勇智编写第 1 章和附录；河北工程技术高等专科学校郝海森编写第 2 章；长江工程职业技术学院牛志宏编写第 6 章；山西水利职业技术学院杜玉柱编写第 3 章和第 8 章；湖南工程职业技术学院左美容编写第 5 章和第 7 章；湖北水利水电职业技术学院聂琳娟编写第 4 章；平顶山工学院马玉晓编写第 9 章。全书由王勇智统稿。

解放军信息工程大学测绘学院翟翊教授审阅了本教材，提出了宝贵的修改意见，在此表示真挚的感谢。

限于编者的水平、经验及时间，书中难免会有欠妥之处，敬请专家、同行和读者斧正。

编 者

目 录

前言

第 1 版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星导航定位技术的发展	1
1.2 俄罗斯的全球导航卫星系统——GLONASS	6
1.3 欧盟的伽利略全球导航卫星系统——GNSS	7
1.4 我国的卫星导航定位系统——北斗号 (Compass)	8
1.5 美国的 GPS 政策和我国的 GPS 跟踪网	14
1.6 我国的 A、B 级 GPS 大地控制网	16
小结	17
习题	17
第 2 章 GPS 测量的坐标系统和时间系统	19
2.1 坐标系统的类型	19
2.2 天球坐标系	21
2.3 地球坐标系	24
2.4 国家大地坐标系与世界大地坐标系	28
2.5 时间系统	31
小结	34
习题	34
第 3 章 GPS 系统组成与 GPS 卫星信号	35
3.1 GPS 系统的组成	35
3.2 GPS 卫星运动	39
3.3 GPS 卫星星历	42
3.4 GPS 卫星信号	45
3.5 GPS 信号接收机	48
小结	52
习题	52
第 4 章 GPS 测量的基本原理	54
4.1 GPS 测量概述	54
4.2 GPS 静态定位原理	57
4.3 GPS 动态定位原理	67
小结	69
习题	69

第 5 章 GPS 测量误差的来源及其影响	70
5.1 GPS 测量误差的来源及分类	70
5.2 与卫星有关的误差	71
5.3 卫星信号的传播误差	75
5.4 与接收机有关的误差	80
5.5 卫星分布的几何图形强度及其他误差	81
小结	82
习题	83
第 6 章 GPS 测量的设计与实施	84
6.1 GPS 测量的技术设计	84
6.2 GPS 控制网的图形设计及原则	91
6.3 GPS 控制网的优化设计	94
6.4 GPS 测前准备及技术设计书的编写	98
6.5 GPS 测量外业实施	101
6.6 技术总结与上缴资料	111
小结	112
习题	112
第 7 章 GPS 测量数据处理	113
7.1 概述	113
7.2 基线向量的解算	118
7.3 GPS 网平差	120
7.4 GPS 高程	122
7.5 测后处理软件“基线解算 4.4”介绍	125
小结	133
习题	133
第 8 章 实时动态 (RTK) 测量系统及应用	134
8.1 RTK 测量方法概述	134
8.2 常规 RTK 测量系统	136
8.3 几种常见 RTK 仪器的使用方法	143
8.4 RTK 测量技术的应用	160
小结	163
习题	164
第 9 章 网络 RTK 测量系统	165
9.1 网络 RTK 概述	165
9.2 基于 VRS 的网络 RTK 系统组成	166
9.3 网络 RTK 系统实例介绍	171
小结	175
习题	175
参考文献	176

第 1 章 绪 论

以世界上第一颗人造地球卫星于 1957 年 10 月 4 日成功发射为标志,人类已进入空间科学技术的崭新时代。近 50 年来,随着卫星测量技术的发展,特别是美国全球定位系统(GPS)的成功建立和应用,使得测绘行业经历了一场深刻的变革。无论是测量精度、适用条件、应用范围,还是在生产效率和经济效益等方面,都发生了巨大飞跃和进步。因此全球导航定位卫星系统(GNPSS),在全球范围内的众多行业中,尤其是在测绘行业有着越来越广泛的应用。可以预言,全球卫星导航定位技术必将与移动通信技术、互联网技术一道成为影响 21 世纪人类生活的三大技术。本章主要介绍卫星大地测量的发展和各国已经建成的或在建的全球卫星导航定位系统的情况,目的是使学生对此有一个清晰的概念和整体的了解。

1.1 卫星导航定位技术的发展

1.1.1 大地测量的发展概况

大地测量的发展可以追溯到两千多年以前,从人们确认地球是个圆球并实测它的大小开始,大体可分为:古代大地测量、经典(或传统)大地测量和现代大地测量三个阶段。其中,经典大地测量阶段可以从 18 世纪中期牛顿、克莱劳确立地球为扁球的理论并从几何和物理两方面来测定地球的大小时算起,到 20 世纪中期莫洛琴斯基发展斯托克司理论,形成现代地球形状理论基础为止,大约 200 年(1750~1950 年)的时间。

经典大地测量阶段的主要任务是为大规模测绘地图服务。为了提高点位测量的精度和速度,许多科学家在测量仪器、测量方法、椭球计算和数据处理方面做了大量研究工作,并取得了丰硕的成果。这些成果至今仍被广泛应用。

1. 三角测量法

17 世纪初,光学望远镜开始应用于天象观测,是测绘科学发展史上一次较大的突破。随后光学望远镜普遍应用于各种测量仪器,使测量目标可以距测站更远,观测精度可以更高。从 1617 年三角测量方法开始应用,到 1668 年已有放大倍率为 40 倍的光学望远镜出现,测量成果的精度被成倍地提高了。

2. 最小二乘法

德国数学家、天文学家、物理学家高斯(Carl Friedrich Gauss, 1777—1855)于 1794 年提出了最小二乘法理论。

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,可分为相对重力测量和绝对重力测量,或按用途分为大地重力测量和物理重力测量。

这个时期由于全球各大陆广泛布设了天文大地三角网,并发展了重力测量,算出了许多著名的双轴参考椭球几何参数,如后来被推荐为 1924 年国际椭球的海福特(Hayford)椭

球。还有许多正常重力公式，如卡西尼（Kassini）计算的公式被推荐为 1930 年国际正常重力公式。此外大地测量技术的应用效果也很显著，如法国为了统一长度标准建立国际“米”制，而应用了子午弧长测量的结果等。

2003 年 12 月 3 日我国国家测绘局宣布停止使用 1985 重力基本网成果，同时启用 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、香港特别行政区和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，在全国范围内布测了近 8 万千米，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。国家天文大地网的布设原则是：①分级布设，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。国家天文大地网至今仍在发挥着作用。

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、电子水准仪、计算机改变了经典测量中的低精度、低效率状况，测量成果精度提高到 10^{-6} 量级以上，并缩短了作业周期，而且使过去无法实现的严密理论计算得以实行。特别是以人造地球卫星为代表的空间科学技术的发展，使测量方式产生了革命性的改变，彻底打破了经典大地测量在点位、精度、时间、应用方面的局限性，不必再受地面条件的种种限制；使建立全球地心大地测量坐标系有了可能；使研究重力场特别是外部重力场几何图形能够迅速实现。空间技术的发展使大地测量的功能更为扩大，大地测量的精度和效率已能配合其他学科用于空间、海洋以及测定地球的各种动力学变化。概括地说：经典大地测量是以刚体地球为研究对象，是静态的、局部的、相对的测量；而现代大地测量则是以可变地球为对象，是动态的、全球的、绝对的测量。

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，具体有：

- (1) 建立与维护国家的，以及全球的地面三维大地网，并研究其变化情况。
- (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随时间的变化。

人造地球卫星技术快速发展，使其在空间科学、气象、遥感、通信、导航、地球科学、地球动力学、天文学、大地测量、资源勘察、灾情预报、环境监测以及军事科学诸领域中得到了广泛的应用。特别是在波黑战争、海湾战争中，现代武器的精确打击得以实现，卫星导航定位技术在其中扮演了无可替代的重要角色。目前世界上几个大国花费巨资，争相研究并建立自己的卫星导航定位系统的决定也就不难理解了。

1.1.2 卫星大地测量的发展

卫星大地测量是现代大地测量一个新的重要分支，是以测定近地人造卫星的空间位置和运动异常来解决大地测量问题的一种方法。卫星大地测量的任务是：

(1) 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提供技术服务。

(2) 精确测定地面点的地心（地球质心）坐标系内的坐标，从而能够将全球大地网联成一个整体，建立全球统一的大地测量坐标系。

(3) 广泛地应用于空中、海上以及陆地运动载体的导航、监控与调度指挥。

1. 卫星大地测量的由来

卫星(或天体)大地测量的基本原理实际上在人造地球卫星出现之前就已形成。当时是以地球的天然卫星——月球为观测对象。最早提出可以用月球观测值研究地球形状的是欧勒(I. A. Euler, 1734—1800)和拉普拉斯(P. S. M. Laplace, 1749—1827)。1768年欧勒是从几何学原理计算出地球子午圈的扁率;1767年拉普拉斯从动力学的角度分析月球绕地运动轨道的异常,详细分析计算了地球的扁率。由于已知量精度不够,月面边缘不齐难以测准,月球太远形成的视差角太小,并且因其远而对地球引力场异常的敏感度不高,难以获得高精度的结果。但这种利用空间天体的测量方法是很先进的。所以20世纪前50年中又有许多人从观测方法、观测仪器方面进行了很多改进,为后来的卫星大地测量准备了理论和实践基础。

人造卫星用于大地测量,同样也是从几何学原理和动力学原理两方面加以研究,它比月球更加方便有利:人造卫星的视角可以大到几十度;卫星离地球近且质量小,它的运动几乎完全决定于地球引力场,月球绕地球一周近一个月,这段时间卫星可以绕地球近400圈,可以迅速收集到大量的有关地球的情况资料。

由引力定律知道,人造卫星离地球越近对地球引力场的变化就越敏感,反映到卫星轨道运动上出现的异常就越明显。因此,人造卫星既可以从几何上看作是一个空中的运动目标,又可以是一个反映地球各种变化的信息传感器,包括几何点位及重力场变化信息、生态、自然环境及资源变化等信息。

2. 卫星大地测量的发展

早期的卫星大地测量仅仅把卫星作为一种空间观测目标,由地面观测站对其进行摄影观测,测定测站点至卫星的方向,建立卫星三角网;也可以使用激光测距技术测定测站至卫星的距离,建立卫星测距网。上述两种观测方法,均可以实现大陆与海岛的联测定位,解决了常规大地测量难以实现的远距离联测定位问题。

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的卫星测量,对北美NDA、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个测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,所以以后就较少使用。

与此同时,激光测距法出现了,即在地面上用激光测距仪对卫星进行测距,以达到定轨定位的目的,精度可达厘米级。但用这种方法定位需要有4个测站组成较好的图形,实施同步观测,这对大面积布网来说是很困难的,因此也未能普及。

上述两种观测和成果换算方法需耗费大量的时间,定位精度较低。因此,这种卫星测量方法很快就被卫星多普勒定位技术所取代,即从仅仅把卫星作为空间观测目标的初级阶段,发展到了把卫星作为动态已知点的高级阶段。

为了克服摄影观测和激光测距方法的缺陷,人们想到了利用卫星发射的无线电波进行距离测量。设想方案是: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 年美国海军和詹斯·霍普金斯大学物理实验室为了给北极核潜艇提供全球导航，开始研制一种利用多普勒卫星定位技术进行测速、定位的卫星导航系统，称之为美国海军导航卫星系统，简称 NNSS (Navy Navigation Satellite System)。由于该系统的卫星通过地极，因此又被称为“子午卫星导航系统”。1959 年 9 月美国发射了第一颗试验卫星，1964 年由 6 颗卫星组成的该系统建成并投入使用。1967 年 7 月，美国政府宣布 NNSS 部分解密，提供民用。由于该系统不受气象条件限制，自动化程度较高，且具有一定的定位精度，立即引起了大地测量学者的极大关注，随后进行了大量的研究和实践，取得了令人瞩目的成就。如在美洲大陆及其附近测设了约 500 个多普勒点；西欧各国分别在 1976 年 5 月和 1977 年 4 月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，而后参加了三角网的重新平差；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 多个多普勒点，从而使常规大地测量无法统一的国家大地控制网建成了统一的坐标系统。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了多普勒定位测量，共观测了 210 次子午卫星通过，精确测定了设在南极乔治岛上的长城站的地理位置为：南纬 $62^{\circ}12'59.811'' \pm 0.015''$ ，西经 $58^{\circ}57'52.665'' \pm 0.119''$ ，高程为 $43.58\text{m} \pm 0.67\text{m}$ ，长城站距北京的距离为 $17\,591\,949.51\text{m}$ 。

与此同时，苏联也建成了一个由 12 颗卫星组成的导航系统，简称为 CICADA。虽然子午卫星导航系统具有划时代的意义，但因其卫星数目少，轨道高度较低（平均 1000km），观测时间间隔较长（平均约 1.5h），因而不能进行三维连续导航。加之求得一次导航解所需的时间较长，不能满足军事导航的需求。从大地测量的要求来看，由于它的定位速度慢（平均观测 1~2d），精度较低（单点定位精度 3~5m，相对定位精度约为 1m），因此，该系统在大地测量学和地球动力学研究方面的应用受到了极大的限制。

3. 美国全球定位系统 (GPS) 的建立

为了克服上述缺陷，满足军事部门和民用部门对连续实时三维导航定位的迫切要求，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“授时与测距导航系统/全球定位系统” (Navigation System Timing and Ranging/Globol Positioning-NAVSTAR/GPS)，而通常简称为“全球定位系统” (GPS)。

为使 GPS 具有高精度的连续实时三维导航能力和良好的抗干扰性能，所以在其设计上采取了若干重大的改善措施。GPS 与 NNSS 的主要特征比较见表 1-1。

表 1-1 GPS 与 NNSS 的主要特征

系统特征	NNSS	GPS
载波频率/GHz	0.15, 0.40	1.23, 1.58
卫星平均高度/km	约 1000	约 20 200
卫星数目/颗	5~6	24 (3 颗备用)
卫星运行周期/min	107	718
卫星钟稳定度	10^{-11}	10^{-12}

从 1978 年发射第一颗 GPS 试验卫星以来, 利用该系统进行定位的研究、开发和试验工作, 发展异常迅速。理论与实践表明, GPS 与之前的导航系统相比, 其主要特点如下:

(1) 全球地面连续覆盖。由于 GPS 卫星数目较多, 且分布合理, 所以地球上任何地点, 均可连续地同步观测到至少 4 颗卫星, 从而保障了全球、全天候连续实时地三维定位。

(2) 功能多、精度高。GPS 可为各类用户连续地提供动态目标的三维位置、三维速度和时间信息。目前, 利用不同测距码实时定位、测速与测时的精度, 见表 1-2。随着 GPS 定位技术和数据处理技术的发展, 其定位、测速和测时的精度将进一步提高。

表 1-2 GPS 实时定位、测速与测时精度

采用的测距码	P 码	C/A 码	采用的测距码	P 码	C/A 码
单点定位/m	5~10	20~40	测速/(m/s)	0.1	0.3
差分定位/m	1	3~5	测时/ns	100	500

(3) 实时定位。利用全球定位系统导航, 可以实时地确定运动目标的三维位置和速度, 由此即可保障运动载体沿预定航线的运行, 也可实时地监视和修正航行路线, 以及选择最佳的航线。

(4) 应用广泛。随着 GPS 定位技术的发展, 其应用的领域在不断拓宽。目前在导航方面, 它不仅广泛应用于海上、空中和陆地运动目标的导航, 而且, 在运动目标的监控和管理, 以及运动目标报警和救援等方面, 也获得了成功的应用; 在测绘工作方面, 这一定位技术在大地测量、工程测量、工程与地壳变形监测、地籍测量、航空摄影测量和海洋测绘等各个领域的应用, 已甚为普遍。

GPS 的建立, 主要是为了满足美国军事部门高精度导航的需要, 所以上述优点对于军事上动态目标的导航, 具有十分重要的意义。正因如此, 美国政府把发展 GPS 作为导航技术现代化的重要标志。近几十年来, 卫星导航定位技术已经渗透到了民用经济建设和人类生活的方方面面。可以预言, 卫星导航定位技术必将与移动通信技术、计算机互联网技术一道成为影响 21 世纪人类生活的三大技术。各国政府都已注意到了卫星导航定位技术在确立国家形象和国际地位中的重要意义, 不惜巨资, 争相建立自己的卫星导航定位系统。后几节中将详细介绍各国已建成或在建的卫星导航定位系统。

1.1.3 卫星导航定位技术相对于常规测量技术的特点

新一代卫星导航定位技术的高度自动化和所达到的定位精度及其潜力, 使广大测量工作者产生了极大兴趣。尤其从 1982 年第一代测量型无码 GPS 接收机 Macrometer V-1000 投入市场以来, 在应用基础研究、应用领域开拓、硬件和软件的开发各个方面, 都得到了蓬勃的发展。我国的测绘科技工作者在这些研究和应用方面, 均取得了骄人的成绩。广泛的实验活动为 GPS 精密定位技术在测量中的应用, 展现了广阔的前景。

相对于常规的测量手段来说, 这一新技术的主要特点如下:

1. 测站间无需通视

既要保持良好的通视条件, 又要保障测量控制网具有良好的图形结构, 这一直是经典测量技术在实践方面的必须面对的难题之一。GPS 测量不要求测站之间相互通视, 因而不需要建造觇标。这一优点既可大大减少测量工作的时间和经费(一般造标费用约占总经费的

30%~50%)，同时又使点位的选择更为灵活。

尚应指出，GPS 测量虽不要求测站之间相互通视，但必须保持测站上空有足够开阔的净空，以使卫星信号的接收不受干扰。

2. 定位精度高

已有的大量实践表明，目前在小于 50km 的基线上，其相对定位精度可达 $(1\sim 2)\times 10^{-6}$ ，而在 100~500km 的基线上可达 $10^{-7}\sim 10^{-6}$ 。随着观测技术与数据处理技术的改善，可望在大于 1000km 的距离上，相对定位精度达到或优于 10^{-8} 。

3. 观测时间短

目前，利用经典的相对静态定位方法，完成一条基线的相对定位所需要的观测时间，根据精度的不同，约为 1~3h。为了进一步缩短观测时间，提高作业速度，近年来发展的短基线（不超过 20km）快速相对定位法，其观测时间仅需几分钟。

4. 提供三维坐标

GPS 测量中，在精确测定测站平面位置的同时，还可以精确测定测站的大地高程。GPS 测量的这一特点，不仅为研究大地水准面的形状和测定地面点的高程开辟了新的途径，同时也为其在航空物探、航空摄影测量及精密导航中的应用，提供了重要的高程数据。

5. 操作简便

GPS 的自动化程度很高，观测中测量员的主要任务只是安置并开关仪器、量取仪器高、监视仪器的工作状态、采集观测环境的气象数据，而其他观测工作，如卫星的捕获、跟踪观测、数据记录等均由仪器自动完成。

6. 全天候作业

GPS 测量工作，可以在任何时间、任何地点连续地进行，一般不受天气状况的影响。因此，GPS 定位技术的发展是对经典测量技术的一次重大突破。一方面，它使经典的测量理论与方法产生了深刻的变革；另一方面，也进一步加强了测量学科与其他学科之间的相互渗透，从而促进了测绘科学技术的现代化发展。

1.2 俄罗斯的全球导航卫星系统——GLONASS

GLONASS 全球导航卫星系统的起步晚于 GPS 9 年。苏联在全面总结 CICADA 第一代卫星导航系统优缺点的基础上，汲取美国 GPS 系统的成功经验，从 1982 年 10 月 12 日发射第一颗 GLONASS 卫星开始，到 1996 年全部建成。13 年间历经周折，期间遭遇了苏联的解体，由俄罗斯接替部署，但始终没有终止或中断 GLONASS 卫星的发射。1995 年初只有 16 颗 GLONASS 卫星在轨工作，当年又进行了 3 次成功发射，将 9 颗卫星送入轨道，完成了 24 颗工作加 1 颗备用卫星的布局。经过数据加载、调整试验，整个系统已于 1996 年 1 月 18 日正常运行。该系统采用了 PZ-90 坐标系，而 GPS 系统采用的是 WGS-84 坐标系。

GLONASS 全球导航卫星系统的组成及工作原理与 GPS 类似，也是由空间卫星星座、地面控制以及用户设备三部分组成。

1.2.1 GLONASS 卫星星座

GLONASS 卫星星座的轨道为 3 个等间隔椭圆轨道面（图 1-1），3 个轨道平面的相互

夹角按升交点经度计算为 120° ，编号按地球自西向东的旋转方向递增，分别为 NO.1、NO.2、NO.3。24 颗卫星均布于 3 个轨道。1~8 号卫星在 NO.1 轨道，其余类推。各轨道的卫星编号均按卫星运动的反方向递增。轨道倾角 $64.8^\circ \pm 0.3^\circ$ ，轨道偏心率为 ± 0.01 。卫星距地面高度为 19 100km，运行周期为 11h15m45s。由于 GLONASS 卫星轨道倾角大于 GPS 卫星的轨道倾角，故在高纬度（50 度以上）地区的可视性较好。地面用户每天提前 4.07min 见到同一颗卫星，在中国境内可见到 24 颗中高度角 5 度以上的 11 颗卫星，比能够见到的 GPS 卫星要多 3~4 颗。每颗 GLONASS 卫星上都装有铯原子钟，以产生高稳定的时间标准，并向所有星载设备提供同步信号。星载计算机将从地面控制站接收到的信息进行处理，生成导航电文向地面用户播发。

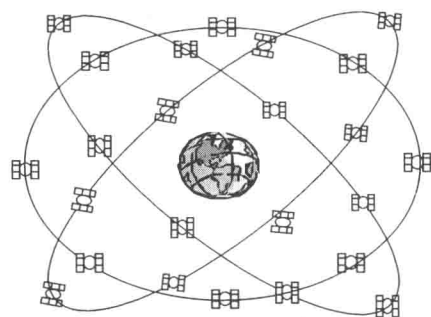


图 1-1 GLONASS 卫星星座

1.2.2 地面控制系统

地面控制系统包括一个系统控制中心（设在莫斯科的 Golisyno-2），一个指令跟踪站（CTS），网络分布在俄罗斯境内。CTS 跟踪着 GLONASS 可视卫星，遥测所有卫星，进行测距数据的采集和处理，并向各卫星发送控制指令和导航信息。在地面控制站（GCS）内有激光测距设备对测距数据作周期修正，为此所有 GLONASS 卫星上都装有激光反射镜。

1.2.3 用户设备

GLONASS 接收机接收 GLONASS 卫星信号并测量其伪距和速度，同时从卫星信号中选出并处理导航电文，计算出接收机位置坐标的 3 个分量、速度的 3 个分量和时间。

GLONASS 全球导航卫星系统进展较快，但生产接收机的厂家较少，且多为专用型。值得注意，GPS 和 GLONASS 双系统信号接收机有很多优点：同时可接受的卫星数目约增加一倍；可以明显改善被测卫星的几何分布；在一些遮挡物较多的城市或森林地区，可提高定位精度；还可以有效地消除美、俄两国对各自系统的可能控制，提高定位的安全性和可靠性。

1.3 欧盟的伽利略全球导航卫星系统——GNSS

我们知道，目前世界上已有两大全球导航定位卫星系统在运行：一是美国的 GPS，二是俄罗斯的 GLONASS。这两个系统分别受到了美国、俄罗斯两国军方的严密控制，其信号的可靠性无法得到保证。长期以来，别国只能在美国、俄罗斯的授权下从事接收机制造、导航服务等从属性工作。科索沃战争时，欧洲完全依赖美国的全球定位系统。当这个系统出于军事目的停止运作时，其他国家的一些企业的许多事物被迫中断。为了能在卫星导航领域占有一席之地，欧盟认识到建立拥有自主知识产权的卫星导航系统的重要性和战略意义，同时在欧洲一体化进程中，还会全面加强诸成员国间的联系与合作。在这种背景下，欧盟决定启动伽利略（Galilue）计划：建设一个军民两用、与现有系统相兼容的、高精度、全开放的全球导航卫星系统——GNSS。

1.3.1 伽利略计划

伽利略计划分四个阶段：论证阶段（1994~2001 年）、系统研制和在轨确认阶段

(2001~2005 年)、星座布设阶段 (2006~2007 年)、运营阶段 (2008 年至今)。

从 1994 年开始, 欧盟进行了对伽利略计划——GNSS 的方案论证。2000 年在世界无线电大会上获得了建立 GNSS 的 L 频段的频率资源。2002 年 3 月 24 日, 欧盟 15 国交通部长会议冲破美国政府的再三干扰, 一致批准了伽利略 GNSS 实施计划, 准备投资 36 亿欧元正式启动伽利略计划。第一颗试验卫星已于 2005 年 12 月 28 日成功发射, 第二颗试验卫星已于 2008 年 4 月 27 日由俄罗斯成功发射。中国政府也已决定投入 2 亿欧元全面参与 GNSS 系统的建设, 开展了约 14 个有关项目的研发、测试合作, 2004 年 1 月 10 日已在长江上进行了 EGNOS 欧洲静地卫星导航重叠系统的动态应用测试。但是, 由于种种原因, GNSS 系统进展缓慢。第一颗正式卫星于 2010 年底在俄罗斯发射, 正式使用推迟到 2014 年。

1.3.2 GNSS 系统

GNSS 由 30 颗卫星 (27 颗工作+3 颗备用) 组成。30 颗卫星分布在 3 个中高度圆轨道面上, 轨道高度 23616km, 轨道倾角 56° , 星座对地面覆盖良好。每颗卫星除了搭载导航设备外, 还增加了一台救援收发器, 可以接收来自遇险用户的求救信号, 并将该信号转发给地面救援协调中心, 后者组织和调度对遇险用户的救援行动。同时卫星还向待援用户通报救援安排, 以便遇险用户等待并配合救援。

地面控制设施包括卫星控制 (用于卫星轨道改正的遥感和遥测) 中心和提供各项服务所必需的地面设施。

种类齐全的 GNSS 接收机不仅可以接收本系统信号, 还可以接收 GPS、GLONASS 两大系统信号, 并且实现导航功能、移动通信功能相结合, 与其他飞行导航系统结合。亦即任何人只要装备了 GNSS 接收机就能接收到 GPS、GLONASS、GNSS 全球导航卫星系统的信号, 享受到三个系统的服务。其服务方式有: 公开服务、商业服务和政府服务三个方面。公开服务将与商业和生命安全服务共享两个开放的导航信号。公开服务主要用于道路交通中的个人导航、道路信息和提供路线建议的系统、移动通信的应用领域。商业服务将主要涉及专业用户, 如测绘、海关、船舶和车辆管理以及关税征收等领域。商业服务将提供在独立频率上的第三种导航信号的接收服务, 并使用户能利用三载波相位模糊分辨力技术 (TCAR) 来改善精度。政府服务的对象是那些对于精度、信号质量和信号传输的可靠性要求极高的用户, 即生命安全服务、搜救服务和政府管理服务领域的用户。

1.4 我国的卫星导航定位系统——北斗号 (Compass)

1.4.1 我国卫星导航系统的发展历程

早在 20 世纪 60 年代末, 我国就开展了卫星导航系统的研制工作, 但由于诸多原因而夭折。自 20 世纪 70 年代后期以来, 国内开展了适合国情的卫星导航系统体制的探讨研究, 先后提出过单星、双星、三星和 3~5 星的区域性系统方案, 以及多星的全球系统的设想, 并考虑到导航定位与通信等综合运用问题, 但是由于种种原因, 这些方案和设想都没能得以实现。在 20 世纪 80 年代到 90 年代, 我国结合国情, 科学、合理地提出并制订了自主研制实施“北斗”卫星导航系统建设的“三步走”规划: 第一步是试验阶段, 即用少量卫星利用地球同步静止轨道来完成试验任务, 为“北斗”卫星导航系统建设积累技术经验、培养人才, 研制一些地面应用基础设施设备等; 第二步是到 2012 年, 计划发射 10 多颗卫星, 建成覆盖亚太区域的“北斗”卫星导航定位系统; 第三步是到 2020 年, 建成由 5 颗静止轨道和 30 颗

非静止轨道卫星组网而成的全球卫星导航系统。

1983年,著名航天专家陈芳允院士首次提出在中国利用两颗地球静止轨道(GEO)通信卫星实现区域快速导航定位的设想。

1989年,我国利用通信卫星开展了双星定位演示验证试验,证明了北斗卫星导航试验系统技术体制的正确性和可行性。

1994年,我国启动北斗卫星导航试验系统建设,正式进入研发阶段。

2000年10月和12月,西昌发射中心发射两颗北斗导航试验卫星,分别定点于东经 80° 和 140° 。

2004年,启动北斗卫星导航系统建设。

2007年4月,该系统首颗中圆轨道(MEO)卫星成功发射,保护了ITU频率资源,开展了国产星载原子钟、精密定轨和时间同步、信号传输体制等技术试验。

2009年4月,该系统首颗倾斜同步轨道(GEO)卫星成功发射,验证了相关技术。

中国“北斗”导航试验系统建成运行,中国成为继美国、俄罗斯之后世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家。该系统已成功应用于测绘、电信、水利、渔业、交通运输、森林防火、减灾救灾和国家安全等诸多领域,经济效益和社会效益显著。特别是在2008年中国南方冰冻灾害、汶川特大地震抗震救灾和北京奥运会中发挥了非常重要的作用。可见,卫星导航定位系统,涉及政治、经济、科技、军事众多领域,对维护国家利益有重大战略意义。

截至2010年底,我国已经成功发射了4颗静止轨道北斗导航试验卫星,组成了具有完全自主知识产权的第一代北斗导航定位卫星系统——北斗一号;还成功发射了8颗中地轨道静止(或非静止)轨道卫星,并将逐步发展为全球导航卫星系统——北斗二号。以上12颗轨道卫星分别是:

2000年10月31日	长三甲	北斗一号A	GEO	E140°	已停用
2000年11月21日	长三甲	北斗一号B	GEO	E80°	使用中
2003年5月25日 0h34m	长三甲	北斗一号C	GEO	E110.5°	使用中
2007年2月3日	长三甲	北斗一号D	GEO	接替A星	使用中
2007年4月14日 0h16m	长三甲	北斗二号1	MEO		使用中
2009年4月15日 0h16m	长三丙	北斗二号2	GEO		使用中
2010年1月17日 0h12m	长三丙	北斗二号3	GEO	E160°	使用中
2010年6月2日 23h53m	长三丙	北斗二号4	GEO	E84.6°	使用中
2010年8月1日 5h30m	长三甲	北斗二号5	IGSO		使用中
2010年11月1日 0h26m	长三丙	北斗二号6	GEO		使用中
2010年12月18日 4h20m	长三甲	北斗二号7	IGSO		使用中
2011年4月10日 4h47m	长三甲	北斗二号8	IGSO		使用中
2011年7月27日 5h44m	长三甲	北斗二号9	IGSO		使用中

1.4.2 我国的“北斗”卫星导航系统政策

“北斗”卫星导航系统的建设与发展遵循开放性、自主性、兼容性、渐进性四项原则，中国愿意与其他国家合作，共同发展卫星导航事业。

四项原则包括：①开放性。“北斗”卫星导航系统的建设、发展和应用将对全世界开放，为全球用户提供高质量的免费服务，积极与世界各国开展广泛而深入的交流与合作，促进各卫星导航系统间的兼容与互操作，推动卫星导航技术与产业的发展。②自主性。中国将自主建设和运行“北斗”卫星导航系统，“北斗”卫星导航系统可独立为全球用户提供服务。③兼容性。在全球卫星导航系统国际委员会（ICG）和国际电信联盟（ITU）框架下，使“北斗”卫星导航系统与世界各卫星导航系统实现兼容与互操作，使所有用户都能享受到卫星导航发展的成果。④渐进性。中国将积极稳妥地推进“北斗”卫星导航系统的建设与发展，不断完善服务质量，并实现各阶段的无缝衔接。

为使“北斗”卫星导航系统更好地为全球服务，加强“北斗”卫星导航系统与其他卫星导航系统之间的兼容与互操作，促进卫星定位、导航、授时服务的全面应用，中国愿意与其他国家合作，共同发展卫星导航事业。同时，中国在频率协调、兼容与互操作、卫星导航标准等方面积极开展国际交流与合作，以推动世界卫星导航领域技术和应用的发展。

目前，中国正在开展与美国 GPS、俄罗斯 GLONASS 和欧洲 GALILEO 等卫星导航系统的频率协调，并参与 ITU 工作组、研究组和世界无线电通信大会的各项活动。“北斗”卫星导航系统作为 ICG 的重要成员，参加了 ICG 历届大会和供应商论坛，与有关国家、区域机构和国际组织开展广泛交流，推动卫星导航系统及其应用的发展。2007 年，“北斗”卫星导航系统成为 ICG 确定的四大全球导航卫星系统核心供应商之一。2009 年第四届 ICG 大会期间，中国全面介绍北斗卫星导航系统的建设、应用与发展情况，并表达了主办 2012 年第七届 ICG 大会的意愿。作为拥有自主卫星导航系统的国家，中国希望通过 ICG 等国际多边和双边渠道，积极探讨在兼容与互操作、卫星导航标准制定、卫星导航性能增强、时间空间基准、应用开发、科学研究等方面开展国际合作的可能，以推动世界卫星导航事业蓬勃发展。

1.4.3 “北斗”卫星导航试验系统——北斗一号

“北斗”卫星导航试验系统（也称“双星定位导航系统”）为我国“九五计划”列项，其工程代号取名为“北斗一号”，其方案于 1983 年提出。2003 年 5 月 25 日零时 34 分，我国在西昌卫星发射中心用“长三甲”运载火箭，成功地将第三颗“北斗一号”卫星送入太空。前两颗卫星分别于 2000 年 10 月 31 日和 12 月 21 日发射升空，运行至今导航定位系统工作稳定，状态良好。2003 年 5 月 25 日发射的是导航定位系统的备份星，它与前两颗“北斗一号”工作星组成了完整的卫星导航定位系统。这标志着我国成为继美国 GPS 和俄罗斯的 GLONASS 后，在世界上第三个建立了完善的卫星导航系统的国家，该系统的建立对我国国民经济发展和国防建设将起到积极作用。2007 年 2 月 3 日，“北斗一号”第四颗卫星发射成功，该卫星不仅作为早期三颗卫星的备份，同时还将进行“北斗”卫星导航定位系统的相关试验。目前，“北斗一号”已有四颗卫星在太空遨游，组成了完整的卫星导航定位系统，确保全天候、全天时提供卫星导航资讯。

“北斗一号”是利用地球同步卫星为用户提供快速定位、简短数字报文通信和授时服务