

高职高专测绘类专业“十二五”规划教材·规范版

教育部测绘地理信息职业教育教学指导委员会组编

# GNSS 测量技术

■ 主 编 杜玉柱

■ 副主编 明东权 刘安伟 范海英



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

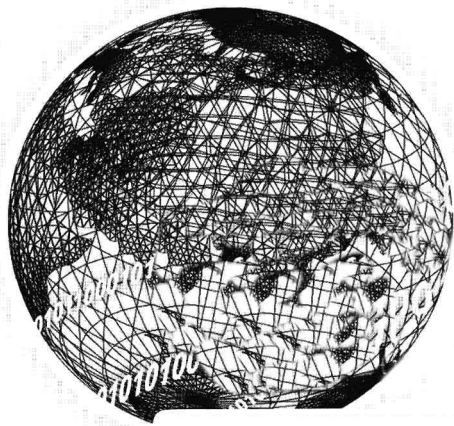
高职高专测绘类专业“十二五”规划教材·规范版

教育部测绘地理信息职业教育教学指导委员会组编

# GNSS测量技术

主 编 杜玉柱

副主编 明东权 刘安伟 范海英



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

GNSS 测量技术/杜玉柱主编;明东权,刘安伟,范海英副主编. —武汉:武汉大学出版社,2013. 2

高职高专测绘类专业“十二五”规划教材·规范版

ISBN 978-7-307-10405-1

I. G… II. ①杜… ②明… ③刘… ④范… III. 卫星导航—全球定位系统—高等职业教育—教材 IV. P228. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 318707 号

责任编辑:林 莉      责任校对:黄添生      版式设计:马 佳

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:荆州市鸿盛印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:11.75 字数:273千字 插页:1

版次:2013年2月第1版      2013年2月第1次印刷

ISBN 978-7-307-10405-1/P·212      定价:25.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高职高专测绘类专业 “十二五” 规划教材·规范版  
编审委员会

**顾问**

宁津生 教育部高等学校测绘学科教学指导委员会主任委员、中国工程院院士

**主任委员**

李赤一 教育部测绘地理信息职业教育教学指导委员会主任委员

**副主任委员**

赵文亮 教育部测绘地理信息职业教育教学指导委员会副主任委员

李生平 教育部测绘地理信息职业教育教学指导委员会副主任委员

李玉潮 教育部测绘地理信息职业教育教学指导委员会副主任委员

易树柏 教育部测绘地理信息职业教育教学指导委员会副主任委员

王久辉 教育部测绘地理信息职业教育教学指导委员会副主任委员

**委员** (按姓氏笔画排序)

王 琴 黄河水利职业技术学院

王久辉 国家测绘地理信息局人事司

王正荣 云南能源职业技术学院

王金龙 武汉大学出版社

王金玲 湖北水利水电职业技术学院

冯大福 重庆工程职业技术学院

刘广社 黄河水利职业技术学院

刘仁钊 湖北国土资源职业学院

刘宗波 甘肃建筑职业技术学院

吕翠华 昆明冶金高等专科学校

张 凯 河南工业职业技术学院

张东明 昆明冶金高等专科学校

李天和 重庆工程职业技术学院

李玉潮 郑州测绘学校

李生平 河南工业职业技术学院

李赤一 国家测绘地理信息局人事司

李金生 沈阳农业大学高等职业学院

杜玉柱 山西水利职业技术学院

杨爱萍 江西应用技术职业学院

陈传胜 江西应用技术职业学院

明东权 江西应用技术职业学院

易树柏 国家测绘地理信息局职业技能鉴定指导中心

赵文亮 昆明冶金高等专科学校

赵淑湘 甘肃林业职业技术学院

高小六 辽宁省交通高等专科学校

高润喜 包头铁道职业技术学院

曾晨曦 国家测绘地理信息局职业技能鉴定指导中心

薛雁明 郑州测绘学校

# 序

武汉大学出版社根据高职高专测绘类专业人才培养工作的需要，于2011年和教育部高等教育高职高专测绘类专业教学指导委员会合作，组织了一批富有测绘教学经验的骨干教师，结合目前教育部高职高专测绘类专业教学指导委员会研制的“高职测绘类专业规范”对人才培养的要求及课程设置，编写了一套《高职高专测绘类专业“十二五”规划教材·规范版》。该套教材的出版，顺应了全国测绘类高职高专人才培养工作迅速发展的要求，更好地满足了测绘类高职高专人才培养的需求，支持了测绘类专业教学建设和改革。

当今时代，社会信息化的不断进步和发展，人们对地球空间位置及其属性信息的需求不断增加，社会经济、政治、文化、环境及军事等众多方面，要求提供精度满足需要，实时性更好、范围更大、形式更多、质量更好的测绘产品。而测绘技术、计算机信息技术和现代通信技术等多种技术集成，对地理空间位置及其属性信息的采集、处理、管理、更新、共享和应用等方面提供了更系统的技术，形成了现代信息化测绘技术。测绘科学技术的迅速发展，促使测绘生产流程发生了革命性的变化，多样化测绘成果和产品正不断努力满足多方面需求。特别是在保持传统成果和产品的特性的同时，伴随信息技术的发展，已经出现并逐步展开应用的虚拟可视化成果和产品又极好地扩大了应用面。提供对信息化测绘技术支持的测绘科学已逐渐发展成为地球空间信息学。

伴随着测绘科技的发展进步，测绘生产单位从内部管理机构、生产部门及岗位设置，进而相关的职责也发生着深刻变化。测绘从向专业部门的服务逐渐扩大到面对社会公众的服务，特别是个人社会测绘服务的需求使对测绘成果和产品的需求成为海量需求。面对这样的形势，需要培养数量充足，有足够的理论支持，系统掌握测绘生产、经营和管理能力的应用性高职人才。在这样的需求背景推动下，高等职业教育测绘类专业人才培养得到了蓬勃发展，成为了占据高等教育半壁江山的高等职业教育中一道亮丽的风景。

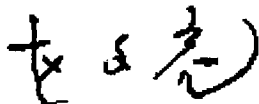
高职高专测绘类专业的广大教师积极努力，在高职高专测绘类专业人才培养探索中，不断推进专业教学改革和建设，办学规模和专业点的分布也得到了长足的发展。在人才培养过程中，结合测绘工程项目实际，加强测绘技能训练，突出测绘工作过程系统化，强化系统化测绘职业能力的构建，取得很多测绘类高职人才培养的经验。

测绘类专业人才培养的外在规模和内涵发展，要求提供更多更好的教学基础资源，教材是教学中的最基本的需要。因此面对“十二五”期间及今后一段时间的测绘类高职人才培养的需求，武汉大学出版社将继续组织好系列教材的编写和出版。教材编写中要不断将测绘新科技和高职人才培养的新成果融入教材，既要体现高职高专人才培养的类型层次特征，也要体现测绘类专业的特征，注意整体性和系统性，贯穿系统化知识，构建较好满足现实要求的系统化职业能力及发展为目标；体现测绘学科和测绘技术的新发展、测绘管理

与生产组织及相关岗位的新要求；体现职业性，突出系统工作过程，注意测绘项目工程和生产中与相关学科技术之间的交叉与融合；体现最新的教学思想和高职人才培养的特色，在传统的教材基础上勇于创新，按照课程改革建设的教学要求，让教材适应于按照“项目教学”及实训的教学组织，突出过程和能力培养，具有较好的创新意识。要让教材适合高职高专测绘类专业教学使用，也可提供给相关专业技术人员学习参考，在培养高端技能应用性测绘职业人才等方面发挥积极作用，为进一步推动高职高专测绘类专业的教学资源建设，作出新贡献。

按照教育部的统一部署，教育部高等教育高职高专测绘类专业教学指导委员会已经完成使命，停止工作，但测绘地理信息职业教育教学指导委员会将继续支持教材编写、出版和使用。

教育部测绘地理信息职业教育教学指导委员会副主任委员



二〇一三年一月十七日

# 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(昆明)会议规划，组织全国 10 余所高职院校编写的全国高职高专测绘类专业“十二五”规划教材之一。

以美国全球定位系统(GPS)为代表的全球卫星导航定位系统(GNSS)是 20 世纪 70 年代的新一代卫星导航定位系统，该系统可向人类提供导航、定位和授时服务，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 GNSS 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、经济以及军事方面具有重要意义。我国也在建立自己的北斗二号导航定位系统，目前已有 15 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、互联网技术一起成为影响 21 世纪人类生活的三大技术。

本教材注重理论与工程实际相结合，力求满足高职教育培养高级“岗位”型人才的要求，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，以利于提高高职学生的动手能力，满足测绘行业对生产第一线高技能技术人才的需要。

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，还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、水文与水资源等非测绘类专业的教材使用，还可供相关工程技术人员作为自学教材或参考书使用。

本书由杜玉柱担任主编，明东权、刘安伟、范海英担任副主编。编写人员及分工如下：山西水利职业技术学院杜玉柱编写第 1 章；辽宁科技学院范海英、山西水利职业技术学院李慧娟合作编写第 2 章；江西应用技术职业学院明东权编写第 3 章；沈阳农业大学高等职业技术学院李娜编写第 4 章；黄河水利职业技术学院齐建伟编写第 5 章；甘肃工业职业技术学院刘安伟编写第 6 章。全书由杜玉柱统稿。

限于编者的水平、经验及时间，书中难免会有错误和疏漏之处，敬请专家、同行和读者不吝斧正。

编者

2012. 10

# 目 录

第 1 章 卫星导航定位技术概况	1
1.1 卫星导航定位技术的发展	1
1.1.1 大地测量的发展概况	1
1.1.2 卫星导航定位技术的产生与发展	3
1.1.3 卫星导航定位技术相对于常规测量技术的特点	5
1.2 全球四大卫星导航系统	7
1.2.1 美国的全球导航卫星系统——GPS	7
1.2.2 俄罗斯的全球导航卫星系统——GLONASS	11
1.2.3 欧盟伽利略全球导航定位系统——GALILEO	12
1.2.4 我国的卫星导航定位系统——北斗号 (COMPASS)	14
1.3 美国的 GPS 政策和我国的 GPS 跟踪网	17
1.3.1 美国政府的 GPS 政策	17
1.3.2 对付 GPS 限制政策的措施	17
1.3.3 我国的 A、B 级 GPS 大地控制网	18
习题和思考题	20
第 2 章 GNSS 卫星导航定位基础	21
2.1 GNSS 测量的坐标系统	21
2.1.1 坐标系统的类型	21
2.1.2 国家大地坐标系与世界大地坐标系	24
2.1.3 坐标系统转换	26
2.2 GNSS 测量的时间系统	29
2.2.1 世界时系统	30
2.2.2 原子时系统	31
2.2.3 力学时系统	31
2.2.4 协调世界时	31
2.2.5 GNSS 时间系统	32
2.2.6 区时	32
2.3 GNSS 测量的高程系统	33
2.3.1 常用高程系统	33
2.3.2 GNSS 水准高程	34



2.3.3 提高 GNSS 高程精度的措施 .....	35
2.4 GNSS 测量的基本方法 .....	36
2.4.1 GNSS 测量方法概述 .....	36
2.4.2 GNSS 静态测量 .....	36
2.4.3 GNSS 动态测量 .....	39
2.5 影响 GNSS 测量的误差因素 .....	41
2.5.1 GNSS 测量的误差来源及分类 .....	41
2.5.2 与卫星有关的误差 .....	42
2.5.3 卫星信号的传播误差 .....	44
2.5.4 与接收设备有关的误差 .....	47
习题和思考题 .....	48
<b>第 3 章 GNSS 静态测量的设计与实施 .....</b>	<b>49</b>
3.1 GNSS 静态测量设计 .....	49
3.1.1 GNSS 测量的技术设计 .....	49
3.1.2 GNSS 网的图形设计 .....	58
3.2 GNSS 测前准备及技术设计书的编写 .....	66
3.2.1 GNSS 测前准备 .....	66
3.2.2 技术设计书的编写 .....	70
3.3 GNSS 静态测量外业实施 .....	71
3.3.1 GNSS 静态测量的选点与埋石 .....	71
3.3.2 外业观测 .....	74
3.4 技术总结与上缴资料 .....	79
3.4.1 技术总结 .....	79
3.4.2 成果验收上缴资料 .....	79
习题和思考题 .....	80
<b>第 4 章 GNSS 测量数据内业解算 .....</b>	<b>81</b>
4.1 概    述 .....	81
4.1.1 数据传输 .....	81
4.1.2 数据预处理 .....	82
4.1.3 基线向量解算 .....	82
4.1.4 网平差 .....	84
4.1.5 GNSS 高程测量 .....	86
4.2 测后处理软件介绍 .....	88
4.2.1 软件的安装 .....	88
4.2.2 新建项目 .....	91
4.2.3 导入数据 .....	92

4.2.4	基线的处理与解算	95
4.2.5	网平差	101
4.2.6	成果输出	104
	习题和思考题	107
<b>第5章</b>	<b>GNSS 动态(RTK)测量</b>	<b>108</b>
5.1	RTK 动态测量概述	108
5.2	常规 RTK 测量系统	109
5.2.1	常规 RTK 测量系统的设备	109
5.2.2	常规 RTK 测量系统作业模式	119
5.3	网络 RTK 测量系统	132
5.3.1	网络 RTK 概述	132
5.3.2	基于 VRS 的网络 RTK 系统组成	136
5.3.3	网络 RTK 系统介绍	139
5.4	GNSS RTK 在地形测量中的应用	141
5.5	GNSS RTK 在工程施工放样中的应用	152
	习题和思考题	156
<b>第6章</b>	<b>GNSS 在控制测量中的应用举例</b>	<b>157</b>
6.1	测区概况及测量任务	157
6.1.1	测区概况	157
6.1.2	测量任务	157
6.2	测前准备和技术设计	158
6.2.1	测前准备	158
6.2.2	技术设计书的编写	158
6.3	野外观测	167
6.3.1	天线安置	168
6.3.2	观测作业	168
6.3.3	观测记录	168
6.4	技术总结与上缴资料	168
6.4.1	技术总结书的编写	168
6.4.2	上交资料	175
	习题和思考题	176
	<b>参考文献</b>	<b>177</b>

# 第1章 卫星导航定位技术概况

## 【教学目标】

本章主要介绍了大地测量的发展概况、卫星导航定位技术的产生与发展、卫星导航定位技术较之传统测量技术的优点以及美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 GNSS 以及我国的“北斗”四种卫星导航定位系统的概况，还介绍了美国政府的 GPS 政策和我国的 A、B 级 GPS 控制网，目的是使学生对此有一个清晰的概念和整体的了解，为进一步学习后续内容做好准备。

## 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，其发展大体可分为：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。

#### 1. 古代大地测量

远在公元前四千多年古埃及，在尼罗河泛滥后，农田边界的整理过程中，就产生了较早的测量技术。古埃及人通过天文观测，确定一年为 365 天，这是古埃及在古王国时期(公元前 3000 年)通用的历法，他们通过观测北极星来确定方向。公元前 340 年，古希腊的科学家亚里士多德就用天文测量方法测定地球的形状和大小，在他的《论天》一书中明确提出地球的形状是圆的，并且他通过对在不同纬度上观测北极星，北极星呈现出位置上的差别，推算出地球大圆的周长为  $4 \times$ “斯特迪亚”，“斯特迪亚”是古埃及及希腊通用的长度单位，现在不清楚一个斯特迪亚的长度究竟是多少。

中国是一个文明古国，测绘技术也发展得相当早，相传公元前两千多年夏代的《九鼎》就是原始地图。公元前五至三世纪，我国就已利用磁石制成最早的指南工具“司南”，中国的最古的天文算法著作《周髀算经》发表于公元前一世纪，书中阐述了利用直角三角形的性质，测量和计算高度、距离等方法。公元 400 年左右，中国发明了计里鼓车，这是用齿轮等机械原理作的测量和确定方位的工具，每走一里，车上木偶击鼓一下，走十里打镮一次，车上的指南针则记录着车子行走的方向。公元 720 年前后，唐代僧人一行(张遂)等人，根据修改旧历的需要，组织领导了我国古代第一次天文大地测量，这次测量北达现今蒙古的乌兰巴托，南达今湖南省的常德，他们在这些地方，分别测量了冬至，夏至和日影长及北极高度，同时还把测量成果绘制成图，他们实测中得出的子午线的长度，是

世界上第一次测量子午线长度，这次测量除了为修改历法提供可靠数据之外，更重要的就是为了求出同一时刻日影差一寸和北极高差一度在地球上的相距离(大约 200 里)。宋代沈括，在他的《梦溪笔谈》中记载了磁偏角现象，这在世界上是最早的发现，沈括在地形测量工程测量方面有较大贡献，他主持绘制了《天下州县图》，使用水平尺、罗盘等进行地形测量，制作地形立体模型。元朝大科学家郭守敬用自制的仪器观测天文，发现黄道平面与赤道平面的交角为  $23^{\circ}33'05''$ ，而且每年都在变化，如果按现在的理论推算，当时这个角度是  $23^{\circ}31'58''$ ，可见郭守敬当时观测精度是相当高的，郭守敬还发明一些精确的内角和检验公式和球面三角计算公式，给大地测量提供了可靠的数学基础，当时，为兴修水利，他还带领队伍在黄河下游进行了大规模的工程测量和地形测量。明代郑和航海图是我国古代测绘技术的又一杰作。该图以南京为起点，最远达非洲东岸的图作蒙巴萨。全图包括亚非两洲，地名 500 多个，其中我国地名占 200 多个，其余皆为亚洲诸国地名。所有图幅都采用“写景”画法表示海岛，形象生动，直观易读。在许多关键的地方还标注“牵星”数据，有的还注有一地到另一地的“更”数，以“更”来计量航海距离等。可以说，郑和航海图是我国古代地图史上真正的航海图。

## 2. 经典大地测量

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，差不多整整 200 年(1750—1950)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。例如：17 世纪初斯约尔创造发明的三角测量法，德国数学家、天文学家、物理学家高斯(Carl Friedrich Gauss, 1777—1855 年)于 1794 年提出了最小二乘法理论以及重力测量等，这些成果至今仍被广泛应用。其中，重力测量应用最为广泛。

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。

## 3. 现代大地测量

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。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、资源勘查、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。

现代大地测量以 GPS 系统为主要标志，GPS 全球卫星定位导航系统是美国从 20 世纪 70 年代开始研制，历时 20 年，耗资 200 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，赢得广大测绘工作者的信赖，并成功地应用于大地测量、工程测量、航空摄影测量、运载工具导航和管理、地壳运动监测、工程变形监测、资源勘察、地球动力学等各种学科，从而给测绘领域带来一场深刻的技术革命。随着全球定位系统的不断改进，硬、软件的不断完善，应用领域正在不断地开拓，目前已遍及国民经济各种部门并开始逐步深入人们的日常生活。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。

### 1.1.2 卫星导航定位技术的产生与发展

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后，人们就开始利用卫星进行定位和导航的研究，人类的空间科学研究和应用跨入了一个崭新的时代，世界各国争相利用人造地球卫星为军事、经济和科学文化服务。同时，卫星定位技术在大地测量中的应用也取得了惊人的发展，迅速跨入了一个崭新的时代。

#### 1. 卫星大地测量的产生

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(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；月球绕地一周近一个月，这段时间卫星可以绕地近 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做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

### (1) 早期的卫星定位技术

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。

### (2) 卫星多普勒定位系统

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17501949.51m。

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1~2天），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。

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的主要特征比较如表1.1所列。

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 20200
卫星数目(颗)	5~6	24(3颗备用)
卫星运行周期(min)	107	718
卫星重稳定度	$10^{-11}$	$10^{-12}$

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，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，一起成为影响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。

### 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 GNSS 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) 功能多、用途广

GNSS 系统不仅可以用于测量、导航、精密定位、动态观测、设备安装，还可以用于测速、测时等，其应用领域还在不断扩大。

#### (2) 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必须面对的难题之一。GNSS 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，GNSS 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。

#### (3) 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  $10^{-8}$ 。

#### (4) 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，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。

#### (5) 提供三维坐标

GNSS 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。GNSS 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。

#### (6) 操作简便

GNSS 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。

#### (7) 全天候作业

GNSS 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，GNSS 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 全球四大卫星导航系统

### 1.2.1 美国的全球导航卫星系统——GPS

#### 1. GPS 系统的组成

GPS 定位系统包括三大部分：①空间星座部分；②地面监控部分；③用户设备部分。如图 1.1 所示。以下分别介绍它们的作用、工作原理和工作状况。

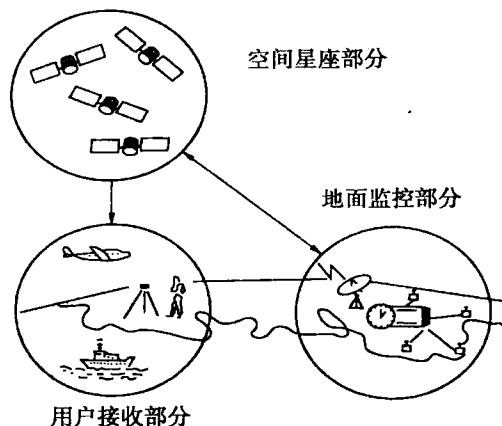


图 1.1 GPS 系统的组成

#### (1) 空间星座部分

空间星座部分是由空间运行的多颗卫星按一定的规则组成的 GPS 卫星星座。其由 24 颗 GPS 工作卫星所组成，其中，21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星共同组成了 GPS 卫星星座。这 24 颗卫星在 6 个倾角为 55 度的轨道上绕地球运行，各个轨道平面之间相距 60 度，轨道平均高度 20200km。卫星的运行周期，即绕地球一周的时间约为 12 恒星时 (11h 58min)。这样，对于地面观测者来说，每天将提前 4min 见到同一颗 GPS 卫星。位于地平线以上的卫星颗数随着时间和地点的不同而不同，最少可见到 4 颗，最多可见到 11 颗。满足了在用 GPS 信号导航定位时，为了解算测站的三维坐标，必须观测 4 颗 GPS 卫星的基本要求。每颗 GPS 工作卫星都发出用于导航定位的信号。GPS 用户正是利用这些信号来进行导航定位工作的。

GPS 卫星空间星座的分布保障了在地球上任何地点、任何时刻至少有 4 颗卫星被同时观测，加之卫星信号的传播和接收不受天气的影响，因此 GPS 是一种全球性、全天候的连续实时定位系统。工作卫星之所以采用二万公里高近于圆形的轨道，一方面是为了增大地面覆盖面积；另一方面是为了使覆盖均匀，从而达到信号强度均匀、接收时间也均匀的目的。

GPS 卫星的主要作用有以下三方面：