



教育部高职高专规划教材

GPS测量定位技术

周建郑 主编



化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

GPS 测量定位技术

周建郑 主编



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

GPS 测量定位技术/周建郑主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 6
教育部高职高专规划教材
ISBN 7-5025-5726-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 058240 号

教育部高职高专规划教材

GPS 测量定位技术

周建郑 主编

责任编辑: 王文峡

文字编辑: 徐卿华

责任校对: 蒋宇

封面设计: 于兵

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

[http:// www. cip. com. cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京兴顺印刷厂印刷

北京兴顺印刷厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12¼ 字数 293 千字

2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5726-1/G · 1496

定 价: 22.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

前 言

《GPS 测量定位技术》系高职测量工程专业的主干课程教材之一。本教材主要是为了满足高职测量工程专业的教学需要,并适应其他相关专业教学及岗位培训的需要而编写的。

《GPS 测量定位技术》是三年制高职测量工程专业的一门必修的专业课。全球卫星定位系统是美国从 20 世纪 70 年代开始研制,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种部门,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。本课程与“测量学”、“测量平差”、“控制测量”及“工程测量”课程之间联系密切,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、通俗易懂、减少不必要的重复。以利于学生学习,具备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。

本书由周建郑主编,共分八章。其中第一章、第二章由孙五继、周建郑编写,第三章、第四章由杨中利、靳祥升编写,第五章、第六章和附录由周建郑、杨中利编写,第七章、第八章由靳祥升、孙五继编写,在本书编写过程中,得到了化学工业出版社和编写者所在单位的大力支持,在此一并致谢。

博士生导师黄声享教授审阅了本教材,并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 5 月

内 容 提 要

本书主要介绍了 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等。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。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，内容精练，突出应用，加强实践。

本书为高职高专测量工程专业的教材，也可供其他相关专业教学及岗位培训参考。

目 录

第一章 绪论	1
学习目标.....	1
第一节 卫星大地测量及其发展	1
一、大地测量的发展概况.....	1
二、卫星大地测量的起源.....	2
三、GPS定位的基本概念.....	4
四、中国GPS卫星跟踪网.....	5
第二节 导航定位卫星及其星座	7
一、GPS卫星及星座.....	7
二、前苏联GLONASS全球卫星导航系统.....	9
三、欧洲空间局的NAVSAT卫星导航系统.....	10
四、伽利略全球卫星导航系统.....	12
五、中国的北斗导航卫星定位系统.....	13
第三节 GPS在国民经济建设中的应用	14
一、GPS在大地测量中的应用.....	14
二、GPS在工程测量中的应用.....	16
三、GPS在航空摄影测量中的应用.....	17
四、GPS在线路勘测及隧道贯通测量中的应用.....	17
五、GPS在地形、地籍及房地产测量中的应用.....	18
六、GPS在水下地形测量中的应用.....	18
七、GPS在其他领域中的应用.....	19
本章小结.....	19
思考题与习题.....	20
第二章 GPS定位的坐标系统和时间系统	21
学习目标.....	21
第一节 参心坐标系	22
一、概述.....	22
二、1954年北京坐标系 [BJZ54 (原)].....	23
三、1980年国家大地坐标系 (GDZ80).....	23
四、1954年新北京坐标系 (BJZ54).....	26
第二节 地心坐标系	26
一、建立地心坐标系的意义和方法.....	26

二、地心坐标系的表述形式	27
三、WGS—84 大地坐标系	27
四、地方独立坐标系	28
五、ITRF 坐标框架简介	28
第三节 天球坐标系	29
一、天球上的点和圈	29
二、岁差与章动	29
三、天球坐标系的建立	30
第四节 时间系统	31
一、概述	31
二、世界时 (UT)	32
三、历书时 (ET)	33
四、原子时 (ATI)	33
五、协调世界时 (UTC)	33
六、力学时 (DT)	34
七、GPS 时 (GPST)	34
八、区时 (T_n)	34
本章小结	35
思考题与习题	35
第三章 GPS 系统的组成与 GPS 信号	36
学习目标	36
第一节 GPS 定位系统的组成	36
一、地面监控部分	36
二、空间卫星部分	38
三、用户接收部分	39
第二节 卫星的运行及其轨道	39
一、理想情况下的卫星运动	40
二、卫星运行的轨道	41
三、摄动力对卫星运行轨道的影响	43
第三节 卫星星历与卫星位置计算	43
一、GPS 卫星星历	44
二、卫星在其轨道平面内的位置计算	45
三、卫星在地心空间直角坐标系中的位置计算	46
第四节 GPS 卫星信号	47
一、GPS 卫星信号的内容	47
二、GPS 信号的结构	49
三、测距码的产生	49
四、GPS 信号的传播	50
五、导航电文	51
第五节 GPS 信号的接收	54

一、信号接收设备的组成	54
二、天线单元	55
三、接收单元	55
本章小结	58
思考题与习题	58
第四章 GPS 卫星定位的基本原理	59
学习目标	59
第一节 GPS 定位概述	59
一、静态定位与动态定位	60
二、单点定位和相对定位	60
三、主动式测距和被动式测距	61
四、用 GPS 定位的基本方法	61
第二节 伪距法定位	62
一、测定伪距的方法	62
二、伪距法定位的原理	63
三、伪距法定位的计算	64
四、伪距定位法的应用	65
第三节 载波相位测量	66
一、载波相位测量原理	66
二、载波相位测量观测方程	67
三、载波相位测量差分法	69
第四节 GPS 动态定位原理	71
一、动态定位的特点	71
二、单点动态定位	72
三、伪距差分动态定位	73
四、GPS 测速	74
五、GPS 定时	75
本章小结	76
思考题与习题	76
第五章 GPS 卫星定位的误差来源及其影响	78
学习目标	78
第一节 GPS 测量的主要误差分类	78
第二节 与卫星有关的误差	79
一、卫星星历误差	79
二、卫星钟的钟误差	80
三、相对论效应	81
第三节 卫星信号传播误差	82
一、电离层折射	82
二、对流层折射	84
三、多路径误差	85

第四节 接收设备误差与图形强度	86
一、接收机钟误差	86
二、天线相位中心位置误差	86
三、等效距离误差	87
四、几何图形强度	87
第五节 整周跳变分析与整周未知数的确定	88
一、整周跳变分析	88
二、整周未知数 N_0 的确定	90
本章小结	91
思考题与习题	91
第六章 GPS 卫星定位测量的设计与实施	93
学习目标	93
第一节 建立 GPS 控制网的技术依据	94
一、GPS 测量的精度分级	94
二、GPS 点的密度	95
三、测量作业基本技术规定	95
第二节 GPS 定位网的布设	97
一、技术设计中应考虑的因素	97
二、GPS 网的布网原则	98
三、GPS 网的联测设计	98
四、卫星空间分布的几何图形强度设计	99
五、野外选点	99
六、标石埋设	101
第三节 GPS 接收机的选择	101
一、接收机的类型选择	101
二、最佳 GPS 接收机具备的条件	103
三、GPS 接收机简介	103
第四节 GPS 定位网的测设方案	106
一、两台接收机相对定位的测设方案	106
二、多台接收机的同步网测设方案	107
三、多台接收机的异步网测设方案	108
第五节 外业观测	109
一、接收设备及其检验	109
二、制定实测方案	110
三、选择最佳观测时段	111
四、编排作业调度表	111
五、天线安置	112
六、观测作业	112
七、外业成果记录	113
第六节 观测成果的外业检核及处理	114

一、野外数据检核	114
二、数据后处理	115
三、技术总结与上交资料	116
本章小结	117
思考题与习题	117
第七章 GPS 控制网的数据处理	119
学习目标	119
第一节 观测数据的预处理	119
一、概述	119
二、预处理的准备工作	121
三、数据预处理的内容	121
第二节 GPS 基线向量的解算	124
一、误差方程的列立	124
二、法方程的组成与解算	126
三、精度评定	127
四、解算结果分析	128
第三节 GPS 基线网独立平差	129
一、概述	129
二、基线网按经典自由网平差	129
三、基线网按亏秩自由网平差	131
第四节 坐标系统的转换	132
一、空间直角坐标与大地坐标的转换	132
二、不同空间直角坐标系之间的坐标转换	133
三、不同大地坐标系之间的坐标转换	136
四、在高斯平面坐标系中的坐标转换模型	136
第五节 GPS 网与地面网的三维平差	139
一、概述	139
二、在空间直角坐标系中的三维约束平差	139
三、在大地坐标系统中的三维约束平差	142
四、三维联合平差	144
五、GPS 网三维平差的若干问题	145
第六节 GPS 网与地面网的二维平差	145
一、二维无约束平差	146
二、二维约束平差	147
三、二维联合平差	148
第七节 GPS 的高程计算	151
一、概述	151
二、拟合法确定正常高程	151
三、GPS 水准应用	152
本章小结	153

思考题与习题.....	153
第八章 GPS 实时动态定位	154
学习目标.....	154
第一节 RTK 概述	154
一、RTK 的工作原理	154
二、RTK 的系统组成	155
第二节 RTK 系统基准站的组成和作用	156
第三节 RTK 流动站的组成和作用	157
第四节 RTK 定位测量的外业准备工作	158
第五节 RTK 的作业方法	158
一、架设基准站.....	159
二、启动基准站.....	159
三、启动流动站.....	160
四、开始测量.....	160
第六节 GPS 网络 RTK 技术	160
一、概述.....	160
二、VRS 的系统构成及工作原理	161
三、VRS 系统的优势	162
本章小结.....	163
思考题与习题.....	163
附录	164
附录一 某市 GPS 三等平面控制网测量技术设计示例	164
附录二 Trimble Geomatics Office (TGO) 软件的使用	169
参考文献	183

第一章

绪论

学 习 目 标

- 了解 GPS 系统的构成，卫星的个数及寿命，卫星的运行周期及发射功率，原子钟的精度，定位信号频率及 GPS 的地面控制系统和用户设备。

- 理解 GPS 系统的应用和发展前景，其相对于其他定位系统的特点和 GPS 应用于测量工作的特点及美国的 GPS 政策。

- 掌握 GPS 定位的基本原理，差分 GPS 的基本原理，GPS 定位技术的发展及在测量中的应用。

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 40 年来，由于卫星测量技术的发展，特别是 GPS 全球卫星定位系统的成功建立和应用，使测绘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及其发展和 GPS 定位的有关情况。

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，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、克莱劳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，如三角测量、最小二乘法及重力测量等。

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、全站仪及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施；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，具体包括以下内容。

- 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、通信、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联成整体，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4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。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，如美国海军导航卫星系统（NNSS）就是成功的一例。

美国海军导航卫星系统（Navy Navigation Satellite System——NNSS）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极点，故也称“子午（Transit）卫星系统”。该系统于1964年建成，1967年7月该系统解密，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1000km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° ，轨道近于圆形，运行周期约120min，对于同一颗子午卫星，每天通过次数最多为13次。卫星播发400MHz和150MHz两种频率的载波供用户和监测站接收。其中，在400MHz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，中国有关测绘和勘察单位开始引进多普勒接收机，不仅在陆地上测设了近百个多普勒点，而且实现了和西（南）沙群岛的联测，还测设了全国性的陆地、海洋多普勒网。

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° ，所以子午卫星几乎是在地球子午面内运行。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40m。又由于卫星较低，覆盖面积小，星数又少，必须相隔0.8~1.6h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1~2天），精度也较低（单点定位精度3~5m，相对定位精度约为0.5~1m），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。

三、GPS 定位的基本概念

众所周知, 测量工作的直接目的是要确定地面点在空间的位置。早期解决这一问题都是采用天文测量的方法, 即通过测定北极星、太阳或其他天体的高度角和方位角以及观测时间, 进而确定地面点在该时间的经、纬度位置和某一方向的方位角。这种方法受到气候条件的制约, 而且定位精度较低。

20 世纪 60 年代以后, 随着空间技术的发展和人造卫星的相继升空, 人们设想, 如果在绕地球运行的人造卫星上装置有无线电信号发射机, 则在接收机钟的控制下, 可以测定信号到达接收机的时间 Δt , 进而求出卫星和接收机之间的距离, 即

$$s = c\Delta t + \sum \delta_i \quad (1-1)$$

式中 c ——信号传播的速度;

δ_i ——各项改正数。

但是, 卫星上的原子钟和地面上接收机的钟不会严格同步, 假如卫星的钟差为 v_i , 接收机的钟差为 v_T , 则由于卫星上的原子钟和地面上接收机的钟不同步对距离的影响为

$$\Delta s = c(v_i - v_T) \quad (1-2)$$

现在欲确定待定点 P 的位置, 可以在该处安置一台 GPS 接收机。如果在某一时刻 t_i 同时测得了 4 颗 GPS 卫星 A、B、C、D 的距离 S_{AP} 、 S_{BP} 、 S_{CP} 、 S_{DP} , 则可列出 4 个观测方程为

$$\left. \begin{aligned} S_{AP} &= [(x_P - x_A)^2 + (y_P - y_A)^2 + (z_P - z_A)^2]^{\frac{1}{2}} + c(v_{iA} - v_T) \\ S_{BP} &= [(x_P - x_B)^2 + (y_P - y_B)^2 + (z_P - z_B)^2]^{\frac{1}{2}} + c(v_{iB} - v_T) \\ S_{CP} &= [(x_P - x_C)^2 + (y_P - y_C)^2 + (z_P - z_C)^2]^{\frac{1}{2}} + c(v_{iC} - v_T) \\ S_{DP} &= [(x_P - x_D)^2 + (y_P - y_D)^2 + (z_P - z_D)^2]^{\frac{1}{2}} + c(v_{iD} - v_T) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中, (x_A, y_A, z_A) , (x_B, y_B, z_B) , (x_C, y_C, z_C) , (x_D, y_D, z_D) 分别为卫星 A、B、C、D 在 t_i 时刻的空间直角坐标; v_{iA} , v_{iB} , v_{iC} , v_{iD} 分别为 t_i 时刻 4 颗卫星的钟差, 它们均由卫星所广播的卫星星历来提供。

求解上列方程, 即得待定点的空间直角坐标 x_P, y_P, z_P 。

由此可见, GPS 定位的实质就是根据高速运动的卫星瞬间位置作为已知的起算数据, 采取空间距离后方交会的方法, 确定待定点的空间位置。

GPS 系统的空间部分由 21 颗工作卫星及 3 颗备用卫星组成, 它们均匀分布在 6 个相对与赤道的倾角为 55° 的近似圆形轨道上, 每个轨道上有 4 颗卫星运行, 它们距地面的平均高度为 20200km, 运行周期为 12 恒星时。GPS 卫星星座均匀覆盖着地球, 可以保证地球上所有地点在任何时刻都能看到至少 4 颗 GPS 卫星。

GPS 定位技术自从应用于测量工程, 就以其特有的自动化、全天候、高精度的显著优势令经典大地测量刮目相看, 具体表现为以下几方面。

(1) 选点灵活 在经典大地测量中, 既要求点位之间有良好的通视条件, 又要求点位形成良好的图形结构, 这是长期困扰选点工作的难题, 而 GPS 定位既不要求点位之间通视, 又对点位图形结构没有过苛要求, 使点位选择极为灵活, 大大便利了点位的应用。

(2) 精度提高 实践已经证明, 在 1000km 的距离上, 相对定位精度可以达到 10^{-8} ; 在 100~500km 的距离上, 相对定位精度可以达到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$; 在小于 50km 的距离上, 相对

定位精度可以达到 10^{-6} 。而另一方面，又无需建造测量觐标。它们的优越性是经典大地测量工作无法攀比的。

(3) 操作简便 GPS 定位的自动化程度很高，作业人员只限于安置仪器、开关仪器、量取仪器高和监视工作状态，其他如卫星捕获、跟踪观测、数据采集等均由仪器自动完成，加之仪器本身质量轻，体积小，携带又方便，大大降低了作业难度，提高了工效。其次，GPS 定位的结果，可以直接提供点的三维坐标，不仅可以精确确定点的平面位置，也为研究大地水准面的形状和确定地面点高程开辟了新途径。

(4) 全天候作业 GPS 定位不受天气条件制约，可以在任何时间、任何地点从事作业，加之观测时间缩短、速度加快，便利了人们对测量工程的统筹安排，使工程计划具有较大的可行性，为准确、快速提供测绘成果提供了可能。

四、中国 GPS 卫星跟踪网

(一) 美国的 GPS 政策

美国在研制 GPS 总体方案时，就已经制定了“主要为军用，同时也兼顾民用的双用途政策”。此后，陆续出台了一系列的“双用途”政策，例如以下几方面。

① 1975 年规定，GPS 卫星发射的无线电信号，含有两种不同的测距码：C/A 码（也称粗码）和 P 码（也称精码）。相应于两种测距码，GPS 将提供两种定位服务，即供民用的标准定位服务（SPS）和专供军用的精密定位服务（PPS）。前者进行单点实时定位的精度约为 20~30m，后者利用 P 码进行单点实时定位的精度可优于 10m。

② 美国从 1990 年 3 月 17 日起实施选择可用性 SA（Selective Availability）技术，其主要内容如下。

a. 在广播星历中对 GPS 卫星的基准频率采用 δ 技术（其变化为无规律的随机变化），降低星历精度，使定位中的已知点（卫星）的位置精度大为降低。

b. 有意地在卫星钟的钟频信号中采用 ϵ 技术（高频抖动），使钟的频率产生快慢变化，导致测距精度大为降低。

实施 SA 技术后，C/A 码实时定位精度，平面位置降低至 100m，高程位置降低至 150m，严重影响了导航定位。2000 年 5 月，美国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。

③ P 码是不公开的保密码，广大民间用户难以应用。近年来，P 码的结构逐渐被人们解译，所以美国又采用新的反电子欺骗 AS（Anti-Spoofing）技术，它是由 P 码和保密的 W 码相加而形成的 Y 码，用于代替 P 码，其结构更为严格保密。一般用户无法解译。该技术仅在特殊情况下使用。

④ 选择可用性 SA 技术是否实施的判断。用户可从导航电文中的 URA（测距精度）值中判别。如 Trimble4000 测地型 GPS 接收机，当 URA 值为 20 以内时，说明未实施 SA 政策，当 URA 值为 30~64 时，说明实施 SA 政策。

(二) 摆脱 GPS 限制政策的途径

美国的 GPS 限制政策严重损害了一般用户的实时定位精度，限制了 GPS 系统在许多高精度领域中应用的可能性。如何摆脱这种限制，是广大用户所关心的问题。

1. 建立独立的卫星导航与定位系统

一些国家和地区致力于发展自己的卫星导航与定位系统。如前苏联建立的全球导航卫星