

高等学校教材

数字测绘基础

上册

杨晓明 苏新洲 编著

SHUZI CEHUI JICHU

测绘出版社

.4
.1

P228.4
Y304.1

高等学校教材

数字测绘基础

上册

杨晓明 苏新洲 编著

测绘出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

《数字测绘基础》(上册)系统、简明地介绍了现代四大测绘新技术中的 GPS 定位技术和野外数字测图技术(下册介绍数字摄影测量与 RS 和数字地图制图与 GIS)。GPS 定位技术主要内容为:全球定位系统(GPS),GPS 卫星信号及定位的基本观测量,GPS 定位测量方法,GPS 静态定位,GPS 动态定位与导航,GPS 水准。野外数字测图主要内容为:野外数字测图概论,数字测图系统的硬件设备,野外数字采集,数字平面图绘制,数字地形图绘制,纸图数字化成图。另外,还简要地介绍了其他卫星定位系统和数字测图成果的应用。

《数字测绘基础》(上册)是面向非测绘专业介绍数字测绘基本理论与技术的本科教材,亦可供初、中级测绘专业技术人员和土建、规划等行业工程技术人员参考。

©杨晓明 苏新洲 2005

图书在版编目(CIP)数据

数字测绘基础. 上册/杨晓明等编著. —北京:测绘出版社,2005. 9

ISBN 7-5030-1282-X

I. 数... II. 杨... III. 数字技术—应用—测绘学
—高等学校—教材 IV. P209

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 096226 号

数字测绘基础 上册

杨晓明 苏新洲 编著

测绘出版社出版发行

地址:北京市西城区复外三里河路 50 号 邮编 100045

电话:(010)68512386 68531558 网址:www.sinomaps.com

北京通州次渠印刷厂印刷 新华书店经销

开本:890mm×1240mm 1/32 印张:9 字数:240 千字

2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷

印数:0001—4000 册

ISBN 7-5030-1282-X/P·408

定价:20.00 元

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

编委会名单

主 编：杨晓明(华北水利水电学院)

副主编：苏新洲(武汉大学测绘学院)

编 委：(以姓氏笔划为序)

马劲松 南京大学城市与资源系

王铁生 华北水利水电学院

李岚发 黑龙江工程学院

陈伟清 广西大学土木工程学院

陈丽华 浙江大学建筑工程学院

张坤宜 广东工业大学建设学院

张保成 内蒙古大学职业技术学院

赵西安 西安建筑科技大学建筑学院

赵吉先 东华理工学院

高 飞 合肥工业大学土建学院

翟 翊 解放军信息工程大学测绘学院

前 言

科学技术的迅速发展,促使了测绘科学技术的巨大变革,出现了以全球定位系统(GPS)、遥感技术(RS)、地理信息系统(GIS)为代表的“3S”测绘新技术。“3S”极大地改变了测绘行业的面貌和作业方式,促使测绘新仪器、新理论、新技术迅速发展,其应用范围和服务对象正在不断地扩大到各种工程建设中和经济生活中。现代测绘从内业到外业,从定位到测图,从仪器到成果都发生了根本性的变化——向着数字化、自动化、智能化、网络化方向发展。为了更新测绘观念,传播测绘新技术、新知识,使测绘新技术更好地为各行各业服务,我们组织编写了《数字测绘基础》,作为非测绘专业学习测绘新技术选修教材。

现代测绘技术主要包括:GPS定位、数字测图(GIS数据采集之一)、数字摄影测量(广义RS之一)、数字制图(GIS之一)。为了方便使用和学习,该教材将测绘四大新技术分四篇介绍,各篇相对独立,自成体系。该教材以介绍技术为主,简明扼要地阐述基本原理,尽量避免理论中的详细的公式推导,注重实用性、可操作性。数字测绘课程应在学习普通测量学之后开设,可根据不同专业的需要选修《数字测绘基础》的有关篇章。为了方便不同专业的教学,将《数字测绘基础》分为上下册。上册内容为:第一篇GPS定位技术,第二篇野外数字测图;下册内容为:第三篇数字摄影测量与RS,第四篇数字制图与GIS。对于土木、交通、水利、房地产、城市规划等专业建议选用上册;对于地理信息、环境保护、资源调查等专业建议选用下册。

本书由杨晓明担任主编并统稿,由苏新洲担任副主编。具体分工:苏新洲主要执笔第一篇,杨晓明主要执笔第二篇;段莉编写第一篇第三章、第二篇第五章,并为本书书稿的文字和图形处理做了大量工作。本书由王依教授担任主审,并提出了宝贵意见。

十分感谢测绘出版社对本书出版给予的资助,十分感谢测绘出版社领导对本书出版给予的支持。本书的编写出版得到了宁津生院士、王依教授以及编写委员会成员的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

感谢。

为了便于教师教学和学生复习,由杨晓明、段莉将全书四篇内容用 PowerPoint 制成电子教案;为了配合本教材教学,将数字测绘有关软件的主要操作(如:GPS 的数据通讯、数据处理、网平差,野外数字测图的平面图、地形图绘制,数字摄影测量的测图、DEM 制作等)制作成带同期录音的视频演示片,需要者请与主编联系。

本书内容有不妥之处,敬请读者批评指正。希望本教材能起到抛砖引玉的作用,恳请使用者根据行业情况提出具体修改建议,以利再版。

编 者

2005 年 5 月

目 录

第一篇 GPS 定位技术

第一章 全球定位系统(GPS)	(1)
§ 1.1.1 全球定位系统(GPS)的组成	(1)
§ 1.1.2 GPS 的特点及应用	(4)
§ 1.1.3 GPS 的发展简述	(6)
第二章 GPS 卫星信号及定位的基本观测量	(10)
§ 1.2.1 GPS 卫星信号	(10)
§ 1.2.2 卫星运动基础	(14)
§ 1.2.3 标准定位服务(SPS)和精密定位服务(PPS)	(16)
§ 1.2.4 GPS 定位的常用观测值	(17)
第三章 GPS 定位测量方法	(19)
§ 1.3.1 GPS 定位的基本原理	(19)
§ 1.3.2 伪距测量	(20)
§ 1.3.3 载波相位测量	(22)
§ 1.3.4 GPS 定位的方法	(27)
§ 1.3.5 GPS 测量作业模式	(29)
§ 1.3.6 GPS 测量定位误差	(31)
第四章 坐标系统和时间系统	(37)
§ 1.4.1 WGS—84 坐标系和我国大地坐标系	(37)
§ 1.4.2 GPS 常用坐标系	(40)
§ 1.4.3 时间系统	(45)
第五章 GPS 信号接收机	(49)
§ 1.5.1 GPS 接收机的构成	(49)
§ 1.5.2 GPS 接收机信号通道简介	(53)
§ 1.5.3 GPS 接收机的分类	(55)
§ 1.5.4 GPS 接收机及附件的检定	(56)

第六章 GPS 静态定位	(59)
§ 1.6.1 布设 GPS 基线向量网的工作步骤	(59)
§ 1.6.2 GPS 测量的技术设计	(63)
§ 1.6.3 GPS 测量的外业实施	(69)
§ 1.6.4 GPS 数据处理	(71)
§ 1.6.5 GPS 基线向量网的平差	(76)
§ 1.6.6 技术总结与提交资料	(79)
第七章 GPS 动态定位与导航	(81)
§ 1.7.1 概 述	(81)
§ 1.7.2 差分定位原理与系统组成	(82)
§ 1.7.3 GPS-RTK 放样	(87)
§ 1.7.4 GPS 卫星导航	(91)
第八章 GPS 水准	(95)
§ 1.8.1 GPS 水准概述	(95)
§ 1.8.2 GPS 水准方法	(96)
§ 1.8.3 国家高程基准	(101)
第九章 其他卫星定位系统简介	(102)
§ 1.9.1 北斗卫星导航定位系统	(102)
§ 1.9.2 GLONASS 全球导航卫星系统	(104)
§ 1.9.3 GALILEO 全球卫星导航系统	(106)

第二篇 野外数字测图

第一章 数字测图概论	(110)
§ 2.1.1 数字测图概念	(110)
§ 2.1.2 数字测图的基本过程	(114)
§ 2.1.3 数字测图的优点	(117)
§ 2.1.4 数字测图作业模式	(120)
第二章 数字测图系统的硬件设备	(125)
§ 2.2.1 全站仪的结构及其测量原理	(125)
§ 2.2.2 全站仪的使用	(135)

§ 2.2.3	数字化仪与扫描仪	(148)
§ 2.2.4	数控绘图仪	(157)
§ 2.2.5	电子手簿与测绘通	(164)
第三章	野外数字采集	(173)
§ 2.3.1	测图前的准备工作	(173)
§ 2.3.2	碎部点测算方法	(176)
§ 2.3.3	测记法野外数据采集	(185)
§ 2.3.4	电子平板法野外数据采集	(191)
第四章	数字图绘制	(211)
§ 2.4.1	数字测图系统操作界面及其内容简介	(211)
§ 2.4.2	数据通讯与参数设置	(214)
§ 2.4.3	平面图绘制	(220)
§ 2.4.4	编辑与注记	(230)
§ 2.4.5	数字地形图绘制	(242)
§ 2.4.6	纸图数字化成图	(251)
第五章	数字测图成果的应用	(258)
§ 2.5.1	数字地形图的基本应用	(258)
§ 2.5.2	数字地形图的在路线勘察设计中的应用	(266)
§ 2.5.3	图数转换	(274)
参考文献		(277)

第一篇 GPS 定位技术

第一章 全球定位系统(GPS)

§ 1.1.1 全球定位系统(GPS)的组成

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)是美国从上世纪 70 年代开始研制,历时 20 年,耗资 200 亿美元,于 1994 年全面建成,具有全方位实时三维导航与定位能力的卫星导航与定位系统。它是在美国海军导航卫星系统(Navy Navigational Satellite System, NNSS)的基础上发展起来的第二代卫星导航系统。全球定位系统由空间部分——GPS 卫星星座、地面监控部分——地面监控系统和用户设备部分——GPS 信号接收机三大部分组成。

一、GPS 卫星星座

GPS 的空间卫星星座由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成。记作(21+3)GPS 星座。

24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内,轨道倾角为 55° ,各个轨道平面之间相距 60° ,即轨道的升交点赤经各相差 60° 。每个轨道平面内各颗卫星之间的升交角距相差 90° ,任一轨道平面上的卫星比西边相邻轨道平面上的相应卫星超前 30° ,如图 1-1-1 所示。GPS 工作卫星发射各种信号,供用户接收后进行导航和定位。

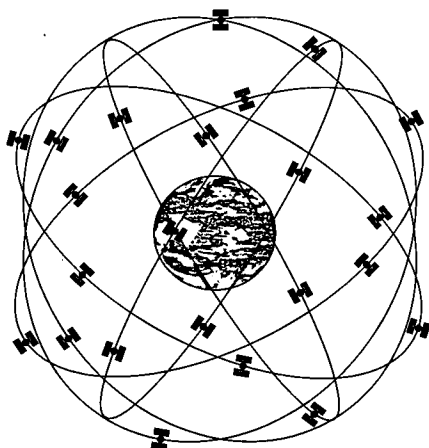


图 1-1-1 GPS 工作卫星及其星座

在两万千米高空的 GPS 卫星,当地球自转一周时,它们绕地球运行二周,即绕地球一周的时间为 12 恒星时(11h58min)。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。在不同的时间和不同的地点,可见的卫星颗数不同,最少可见到 4 颗,最多可见到 11 颗。在用 GPS 信号导航定位时,为了解算测站的三维坐标,至少要观测 4 颗 GPS 卫星。而这 4 颗卫星的几何位置的分布对定位精度有一定的影响。因此对于某地的某一时刻,可能测不出精确的点位坐标,这种时间段叫做“间隙段”。但这种时间间隙段是很短暂的,并不影响全球绝大多数地方的全天候、高精度、连续实时导航定位测量。

GPS 工作卫星的编号是按照美国航天局(NASA)在其序列文件中给出的编号。但在导航定位测量中,若需查询某颗卫星的相关数据,则要采用称为伪随机噪声码(PRN)的 GPS 卫星编号,以识别和确定该颗卫星。

二、地面监控系统

GPS 的监控部分由分布在全球的若干个地面跟踪站所组成的监控系统构成。

对于导航定位来说, GPS 卫星是一动态已知点。卫星的位置是根据其星历——描述卫星运动及其轨道的参数——算得的。每颗 GPS 卫星的星历,都是由地面监控系统提供的。卫星上的各种设备是否工作正常,以及卫星是否一直沿着预定轨道运行,都要由地面设备进行监测和控制。地面监控系统还要保证各颗卫星在统一的时间标准——GPS 时间系统下工作。为了完成这些任务,就需要许多地面监控站对卫星进行跟踪监测,这就是所谓的地面监控系统。

地面监控系统分为主控站、监控站和注入站。主控站有 1 个,位于美国科罗拉多(Colorado)的法尔孔(Falcon)空军基地。它的作用是负责整个地面监控系统的正常运行,根据各监控站得到的 GPS 的观测数据,计算出卫星的星历和卫星钟的改正参数等,并将这些数据传送到注入站,对卫星进行控制,向卫星发布指令。工作卫星一旦出现故障时,调度备用卫星,替代失效的卫星工作。另外,主控站还是一个监控站。监控站有 5 个,除了主控站外,其他 4 个分别位于夏威夷(Hawaii)、阿松森群岛(Ascencion)、迭哥加西亚(Diego Garcia)、卡瓦加兰(Kwajalein),它们的作用是接收 GPS 卫星信号,监测卫星的工作状态。注入站有 3 个,它们分别位于阿松森群岛、迭哥加西亚、卡瓦加兰,注入站的作用是将主控站发来的卫星星历和卫星钟的改正数等注入到卫星中去,并主动向主控站报告自己的工作情况。

三、GPS 信号接收机

GPS 信号接收机作为用户设备部分,其作用是:捕获按一定卫星高度截止角所选择的待测卫星的信号,并跟踪这些卫星的运行;对所接收到的 GPS 信号进行变换、放大和处理,以便测量出 GPS 信号从卫星到接收机天线的传播时间;解译出 GPS 卫星所发送的导航电文,实时地计算出测站的三维位置、速度和时间。

§ 1.1.2 GPS 的特点及应用

一、GPS 系统的特点

GPS 系统具有高精度、全天候、高效率、多功能、操作简便等特点,具体表现为以下 7 个方面。

1. 定位精度高

实践已经证明, GPS 相对定位精度在 50km 以内可达 10^{-6} , 100~500km 可达 10^{-7} , 1000km 可达 10^{-9} 。在距离为 300~1500m 的工程精密定位中, 若有 1h 的观测值, 解得的平面位置误差小于 1mm, 与 ME-5000 电磁波测距仪测定的边长比较, 其边长较差最大为 0.5mm, 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, 数据处理软件的不断更新, 目前 20km 以内静态相对定位只需观测 15~20min; 快速静态相对定位测量时, 当流动站与基准站相距在 15km 以内时, 流动站观测时间只需 1~2min。若采用准动态定位时, 每站观测只需几秒钟。

3. 测站间无须通视

GPS 测量要求测站上空开阔即可, 测站之间无须通视, 因此可节省大量的造标费用。由于无需点间通视, 点位可根据需要灵活布设。观测时可灵活构网, 摆脱了经典大地网中图形强度要求的束缚。

4. 提供三维坐标

传统大地测量方法分为平面和高程两个不同的系统, 采用不同方法施测, 得到控制点的平面位置和高程。而由 GPS 测量, 能同时精确测定测站点的三维坐标。若要获取点位的几何高程, 可采用 GPS 水准的方法。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, 有的已达“傻瓜化”的程度; 接收机的体积也越来越小, 重量越来越轻, 极大地减轻

了测量工作者的工作紧张程度和劳动强度,使野外工作变得相对轻松愉快。

6. 全天候作业

目前, GPS 观测可在任何时间进行,且不受阴天黑夜、起雾刮风、下雨下雪等气候的影响。

7. 功能多

GPS 系统不仅可用于定位测量、导航,还可用于测速、测时。其测速的精度可达 0.1m/s ,测时的精度可达几十纳(10^{-9})秒。当初设计 GPS 系统的主要目的是用于导航,收集情报等军事目的。但后来的应用开发表明, GPS 系统不仅具有上述功能,而且用 GPS 卫星发来的导航定位信号能够进行厘米级甚至毫米级精度的静态相对定位,米级至亚米级精度的动态定位、亚米级至厘米级精度的速度测量和纳秒级精度的时间测量。

二、GPS 系统的应用前景

随着研究的不断深入, GPS 系统的应用领域不断扩大,应用前景越来越好。

在大地测量方面, GPS 技术用于开展国际联测,建立全球性大地控制网,提供高精度的地心坐标,测定和精化大地水准面,建立各级测量控制网,提供高精度的平面和高程三维基准。

在工程测量方面, GPS 静态相对定位技术用于布设精密工程控制网,用于城市建设、矿区和油田地面沉降监测、大坝变形监测、高层建筑变形监测、隧道贯通测量等精密工程。 GPS 实时动态定位技术(简称 RTK)用于工程施工放样等。

在数字化测图中,应用 GPS RTK 技术加密测图控制点,测绘各种比例尺地形图。

在航空摄影测量方面,应用 GPS 技术进行航测外业控制测量、航摄飞行导航、机载 GPS 航测等航测成图的各个阶段。

在地球动力学方面, GPS 技术用于全球板块运动监测和区域板块运动监测。

此外,在军事、交通、邮电、煤矿、石油、建筑、农业、气象、土地管理,以及金融、公安、电力、通讯、城市管理部门和行业,在航空航天、测时授时、物理探矿、姿态测定等领域,GPS 技术也都有着广泛的应用。

§ 1.1.3 GPS 的发展简述

一、GPS 溯源

1. 无线电导航系统

在卫星定位系统出现之前,远程导航与定位主要采用无线电导航系统,此系统主要分为 3 种类型。

(1)罗兰-C 导航系统:工作频率为 100kHz,由 3 个地面导航台组成,导航工作区域 2000km,一般定位精度为 $\pm(200\sim300)\text{m}$;

(2)Omega(欧米茄)导航系统:工作频率为十几千赫,由 8 个地面导航台组成,可覆盖全球,其定位精度仅为几千米;

(3)多普勒导航系统:利用多普勒频移原理,通过测量其频移得到运动载体的参数,推算出飞行器位置,属自备式航位推算系统。定位误差随航程增加而累加。多普勒系统的缺点除覆盖的工作区域小外,因电波的传播受大气的影响使得定位精度不高。

2. 卫星定位系统

最早的卫星定位系统是美国的海军导航卫星系统(Navy Navigational Satellite System, NNSS),因该系统中卫星的轨道都通过地极,也叫子午(Transit)卫星导航系统,于 1958 年底开始研制,1964 年正式投入使用。由于该系统卫星数目较小(5~6 颗),运行高度较低(平均 1000km),从地面站观测到卫星的时间间隔较长(平均 1.5h),因而它无法提供连续的实时三维导航定位;再因其射电频率低,对电离层效应的影响难以补偿,导致定位精度较低。为满足军事部门和民用部门对连续实时和三维导航定位的迫切要求,美国国防部在 1973 年制定了“授时与测距导航系统/GPS”计划,即“全球定位系统(GPS)”。

GPS 发展实施计划共分三个阶段:第一阶段为方案论证和初步设计阶段。从 1973 年到 1979 年,共发射了 4 颗试验卫星,研制了地面接收机,建立了地面跟踪网;第二阶段为系统论证阶段。从 1979 年到 1984 年,又陆续发射了 7 颗试验卫星,研制了各种用途接收机,使 GPS 系统全面进入工程建设与实验阶段。这一阶段的实验表明,GPS 定位精度达到或超过了设计标准。随着 1989 年 2 月 4 日第一颗 GPS 工作卫星(Block II)发射成功,表明第三阶段——实用生产阶段正式开始。截止 1993 年底,工程浩大的 GPS 系统(21+3 座卫星)全面建成并正式投入使用。

二、GPS 的发展趋势

GPS 的发展包括两个方面,一方面是 GPS 系统本身技术的发展与完善,实现 GPS 现代化;另一方面是 GPS 应用的拓展,形成 GPS 产业。

1. GPS 现代化

GPS 现代化的提法是 1999 年 1 月 25 日美国副总统以文告的形式发表的。文告虽只提出了几项民用 GPS 导航技术的改进和发展,但其整个 GPS 现代化实质是要加强 GPS 对美军在现代化战争中的支撑和保持全球民用导航领域中的领导地位。随后美国军方和波音公司(GPS 系统主要制造商)发表的文章对 GPS 现代化作了进一步的阐明:一是保护,即 GPS 现代化是为了更好地保护美方和友好方的使用,要发展军码和强化军码的保密性能,加强抗干扰能力;二是阻止,即施加各种干扰,阻扰敌对方的使用;三是保持,即在有“威胁”地区以外的民用用户,能保持更精确更安全的使用。

GPS 现代化包括军事和民用两部分。

GPS 现代化中的军事部分,是为了满足和适应 21 世纪美国国防现代化发展的需要。在今后“信息战”“电子战”的背景下,GPS 必须要有更好的抗电子干扰能力,要有安全的 GPS 使用范围。这又包括两方面,一是 GPS 用户能安全使用,对不同类型 GPS 用户的使用范围要有所不同,区别对待。目前美国军方授权所在国家和地区的军方使用

的用户有 27 个,其中主要是北约国家的军方。授权亚太地区军方使用 GPS 的国家和地区主要有:韩国、中国台湾、日本、新加坡、沙特阿拉伯、科威特、泰国等。二是 GPS 用户首次初始化时间要更短。因此,GPS 现代化将采取 4 项技术措施:增加 GPS 卫星发射的信号强度,以增加 GPS 信号频道抗电子干扰的能力;为提高抗破译的保密安全性能,增加新的军用码(M 码),并将 M 码与民用码分开。军事用户的接收设备要比民用的接收设备有更好的保护装置,特别是抗干扰能力和快速初始化功能;创造新的技术,以阻止和阻扰敌方使用 GPS。

GPS 现代化中的民用部分,是为了更好地满足民用导航、定位、大气探测等方面的需求。GPS 系统将在 5 个主要方面有所作为:①改善民用导航和定位的精度;②扩大服务的覆盖面和改善服务的持续性;③提高导航的安全性,如增强信号功率,增加导航信号和频道;④保持 GPS 在全球定位系统中技术和销售的领先地位;⑤注意和其他的民用空间导航系统的匹配和兼容。

目前在轨的 31 颗卫星运行正常。其中的 26 颗是属于 GPS Block II A 型,在 2002 年初,由原计划的 5 年寿命延长到 10.6 年,其中的两颗 Block II R 型号的 GPS 卫星正在轨道上正常运行,其中的一颗是 1999 年 10 月 7 日发射的。最新型的 Block II F 已进入工厂生产线,并将陆续发射升空入轨。

GPS 现代化第二阶段发射 6 颗 GPS Block II F(“II Flite”)。GPS Block II F 型卫星除了有上面提到的 GPS Block II R 型卫星的功能外,还进一步强化发射 M 码的功率和增加发射第三民用频率,即 L_5 频道。GPS II F 型卫星的第一颗的发射不迟于 2005 年。到 2008 年在空中运行的 GPS 卫星中,至少有 18 颗 II F 型卫星,以保证 M 码的全球覆盖。到 2016 年 GPS 卫星系统应全部以 II F 卫星运行,共计 24+3 颗。GPS 现代化计划的第三阶段发射的 GPS Block III 型卫星,在 2003 年前完成代号为 GPS III 的 GPS 完全现代化计划设计工作。目前正在探究未来 GPS 卫星导航的需求,讨论制定 GPS III 型卫星系统结构,系统安全性、可靠程度和各种可能的风险,计划在 2008 年要发射 GPS III 的第一颗实验卫星。计划用近 20 年的时间完成 GPS III 计划,取代目