

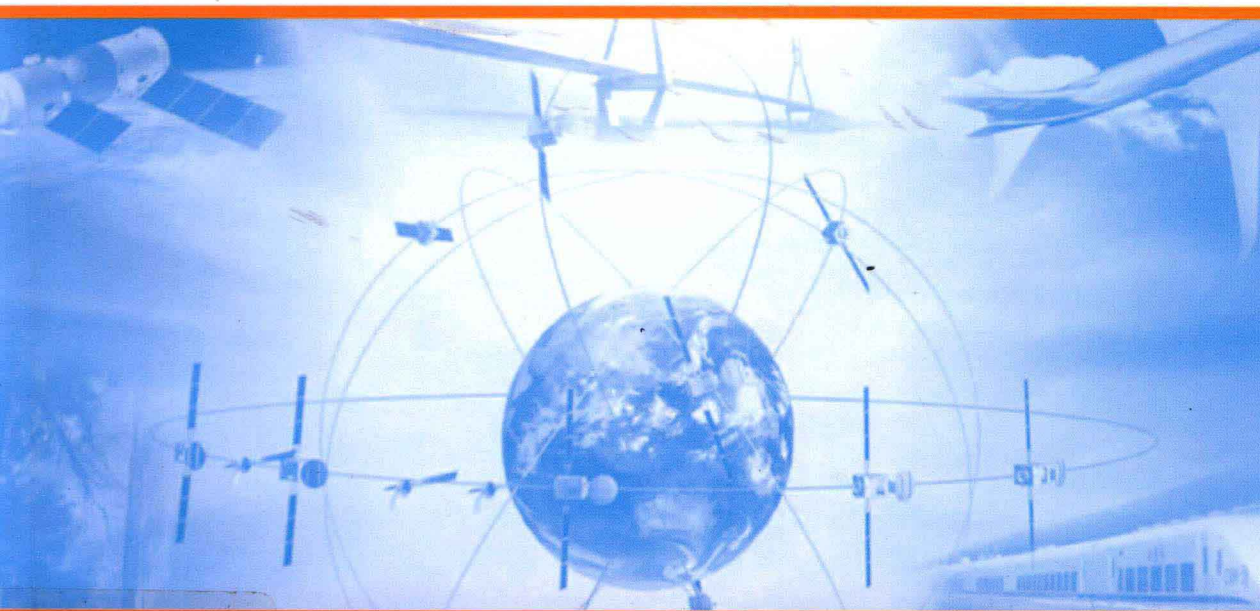


21世纪交通版高等学校教材

卫星导航定位原理与应用

The Principle and Application of Satellite Navigation and Positioning

高成发 胡伍生 编 著



人民交通出版社
China Communications Press

21 世纪交通版高等学校教材

The Principle and Application of
Satellite Navigation and Positioning
卫星导航定位原理与应用

高成发 胡伍生 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为 21 世纪交通版高等学校教材,书中全面介绍了卫星导航定位系统中 GPS 的测量原理及其应用,主要内容包括:卫星大地测量基本知识、GPS 定位的基本原理、差分 GPS 定位原理、GPS 测量控制网设计与实施、GPS 测量数据处理、GPS 精密高程测量以及 GPS 工程应用等。同时对 GPS 之外的三个卫星导航定位系统有较为深入的系统介绍,对网络 RTK 和精密单点定位(PPP)的定位原理也有深入介绍。

本书概念清晰、通俗易懂、实用性强,可作为高等院校测绘类或相关专业本科生以及研究生的通用教材,也可供测绘、交通、国土、城建、水电、地质、采矿等部门从事 GPS 工作的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航定位原理与应用 / 高成发, 胡伍生编著

— 北京: 人民交通出版社, 2011. 9

ISBN 978-7-114-08946-6

I. ①卫… II. ①高… ②胡… III. ①卫星导航—全球定位系统 IV. ①TN967.1②P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 194303 号

21 世纪交通版高等学校教材

书 名: 卫星导航定位原理与应用

著 作 者: 高成发 胡伍生

责任编辑: 岑 瑜

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 18.75

字 数: 442 千

版 次: 2011 年 9 月 第 1 版

2011 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08946-6

定 价: 45.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



21 世纪交通版
高等学校教材(公路与交通工程)编审委员会

顾 问:王秉纲 (长安大学)

主任委员:沙爱民 (长安大学)

副主任委员:(按姓氏笔画排序)

王 炜 (东南大学)

陈艾荣 (同济大学)

徐 岳 (长安大学)

梁乃兴 (重庆交通大学)

韩 敏 (人民交通出版社)

委 员:(按姓氏笔画排序)

马松林 (哈尔滨工业大学)

王殿海 (吉林大学)

叶见曙 (东南大学)

石 京 (清华大学)

向中富 (重庆交通大学)

关宏志 (北京工业大学)

何东坡 (东北林业大学)

陈 红 (长安大学)

邵旭东 (湖南大学)

陈宝春 (福州大学)

杨晓光 (同济大学)

吴瑞麟 (华中科技大学)

陈静云 (大连理工大学)

赵明华 (湖南大学)

项贻强 (浙江大学)

郭忠印 (同济大学)

袁剑波 (长沙理工大学)

黄晓明 (东南大学)

符锌砂 (华南理工大学)

裴玉龙 (哈尔滨工业大学)

颜东煌 (长沙理工大学)

秘 书 长:沈鸿雁 (人民交通出版社)

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,全球经济一体化趋势进一步加强,科技对于经济增长的作用日益显著,教育在国家经济与社会发展中所处的地位日益重要。进入新世纪,面对国际国内经济与社会发展所出现的新特点,我国的高等教育迎来了良好的发展机遇,同时也面临着巨大的挑战,高等教育的发展处在一个前所未有的重要时期。其一,加入WTO,中国经济已融入到世界经济的发展进程之中,国家间的竞争更趋激烈,竞争的焦点已更多地体现在高素质人才的竞争上,因此,高等教育所面临的是全球化条件下的综合竞争。其二,我国正处在由计划经济向社会主义市场经济过渡的重要历史时期,这一时期,我国经济结构调整将进一步深化,对外开放将进一步扩大,改革与实践必将提出许多过去不曾遇到的新问题,高等教育面临加速改革以适应国民经济进一步发展的需要。面对这样的形势与要求,党中央国务院提出扩大高等教育规模,着力提高高等教育的水平与质量。这是为中华民族自立于世界民族之林而采取的极其重大的战略步骤,同时,也是为国家未来的发展提供基础性的保证。

为适应高等教育改革与发展的需要,早在1998年7月,教育部就对高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订。在新的专业目录中,土木工程专业扩大了涵盖面,原先的公路与城市道路工程,桥梁工程,隧道与地下工程等专业均纳入土木工程专业。本科专业目录的调整是为满足培养“宽口径”复合型人才的要求,对原有相关专业本科教学产生了积极的影响。这一调整是着眼于培养21世纪社会主义现代化建设人才的需要而进行的,面对新的变化,要求我们对人才的培养规格、培养模式、课程体系和内容都应作出适时调整,以适应要求。

根据形势的变化与高等教育所提出的新的要求,同时,也考虑到近些年来公路交通大发展所引发的需求,人民交通出版社通过对“八五”、“九五”期间的路桥及交通工程专业高校教材体系的分析,提出了组织编写一套21世纪的具有鲜明交通特色的高等学校教材的设想。这一设想,得到了原路桥教学指导委员会几乎所有成员学校的广泛响应与支持。2000年6月,由人民交通出版社发起组织全国面向交通办学的12所高校的专家学者组成21世纪交通版高等学校教材(公路类)编审委员会,并召开第一次会议,会议决定着手组织编写土木工程专业具有交通特色的道路专业方向、桥梁专业方向以及交通工程专业教材。会议经过充分研讨,确定了包括基本知识技能培养层次、知识技能拓宽与提高层次以及教学辅助层次在内的约130种教材,范围涵盖本科与研究生用教材。会后,人民交通出版社开始了细致的教材编写组织工作,经过自由申报及专家推荐的方式,近20所高校的百余名教授承担约130种教材的主编工作。2001年6月,教材编委会召开第二次会议,全面审定了各门教材主编院校提交的教学大纲,之后,编写工作全面展开。

21世纪交通版高等学校教材编写工作是在本科专业目录调整及交通大发展的背景下展开的。教材编写的基本思路是:(1)顺应高等教育改革的形势,专业基础课教学内容实现与土木工程专业打通,同时保留原专业的主干课程,既顺应向土木工程专业过渡的需要,又保持服务公路交通的特色,适应宽口径复合型人才培养的需要。(2)注重学生基本素质、基本能力的

培养,为学生知识、能力、素质的综合协调发展创造条件。基于这样的考虑,将教材区分为二个主层次与一个辅助层次,即基本知识技能培养层次与知识技能拓宽与提高层次,辅助层次为教学参考用书。工作的着力点放在基本知识技能培养层次教材的编写上。(3)目前,中国的经济发展存在地区间的不平衡,各高校之间的发展也不平衡,因此,教材的编写要充分考虑各校人才培养规格及教学需求多样性的要求,尽可能为各校教学的开展提供一个多层次、系统而全面的教材供给平台。(4)教材的编写在总结“八五”、“九五”工作经验的基础上,注意体现原创性内容,把握好技术与教学需要的关系,努力体现教育面向现代化、面向世界、面向未来的要求,着力提高学生的创新思维能力,使所编教材达到先进性与实用性兼备。(5)配合现代化教学手段的发展,积极配套相应的教学辅件,便利教学。

教材建设是教学改革的重要环节之一,全面做好教材建设工作,是提高教学质量的重要保证。本套教材是由人民交通出版社组织,由原全国高等学校路桥与交通工程教学指导委员会成员学校相互协作编写的一套具有交通出版社品牌的教材,教材力求反映交通科技发展的先进水平,力求符合高等教育的基本规律。各门教材的主编均通过自由申报与专家推荐相结合的方式确定,他们都是各校相关学科的骨干,在长期的教学与科研实践中积累了丰富的经验。由他们担纲主编,能够充分体现教材的先进性与实用性。本套教材预计在二年内完全出齐,随后,将根据情况的变化而适时更新。相信这批教材的出版,对于土木工程框架下道路工程、桥梁工程专业方向与交通工程专业教材的建设将起到有力的促进作用,同时,也使各校在教材选用方面具有更大的空间。需要指出的是,该批教材中研究生教材占有较大比例,研究生教材多具有较高的理论水平,因此,该套教材不仅对在校学生,同时对于在职学习人员及工程技术人员也具有很好的参考价值。

21世纪初叶,是我国社会经济发展的重要时期,同时也是我国公路交通从紧张和制约状况实现全面改善的关键时期,公路基础设施的建设仍是今后一项重要而艰巨的任务,希望通过各相关院校及所有参编人员的共同努力,尽快使全套21世纪交通版高等学校教材(公路类)尽早面世,为我国交通事业的发展做出贡献。

21世纪交通版
高等学校教材(公路类)编审委员会
人民交通出版社
2001年12月

前 言

全球卫星导航定位系统是利用在空间飞行的卫星,不断向地面广播发送加载了某些特殊定位信息的无线电信号来实现定位测量的导航定位系统。其一般都包含三个部分:第一部分是空间运行的卫星星座,多个卫星组成的星座系统向地面发送某种时间信号、测距信号和卫星瞬时的坐标位置信号;第二部分是地面控制部分,它通过接收上述信号来精确测定卫星的轨道坐标、时钟差异,判断其运转是否正常,并向卫星注入新的卫星轨道坐标,进行必要的卫星轨道纠正等;第三部分是用户部分,它通过卫星信号接收机接收卫星广播发送的多种信号并进行处理,计算确定用户的最终位置,用户接收机通常与某一确定目标固连在地面上或不同运载工具上,实现定位和导航的目的。目前正在运行的全球导航定位系统(GNSS)有美国的GPS和俄罗斯的GLONASS,正在组网的全球导航定位系统有欧盟的GALILEO和我国的北斗二代COMPASS-II。

全球定位系统(Global Positioning System)是美国国防部为陆、海、空三军研制的新一代卫星导航定位系统。目前,GPS卫星定位技术正广泛应用于测绘、导航、通信和其他许多领域。随着全球定位系统的不断改进,硬、软件不断完善,应用领域正在不断地开拓。从发展趋势看,GPS卫星定位技术还将更加深入和普及到我国的国民经济建设乃至人们的日常生活之中。

GNSS特别是GPS的出现,给测绘学科带来了巨大的变革。GPS测量技术已成为测绘学科中极其重要和必不可少的内容。本教材重点介绍当前应用较为成熟的GPS测量原理与应用,同时对GPS之外的三个卫星导航定位系统有较为深入的系统介绍,对网络RTK和精密单点定位(PPP)的定位原理也有深入介绍。本教材编写的目的就是适应普通工科高等院校测绘工程专业及相关专业开设GPS课程教学的需要。

本书由高成发、胡伍生主编,参加编写的有东南大学高成发(第2、3、4、6章)、胡伍生(第5、10章)、吴向阳(第1、8章)、于先文(第7、9、11章)。

本书力求做到理论与工程实际相结合,反映当前的最新技术。虽然我们尽了很大的努力,但由于卫星导航定位技术是一种新兴的科学技术,发展日新月异;同时也由于编者水平和实际经验有限,书中难免存在不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

2010年12月于南京

E-mail: gaochfa@seu.edu.cn

目 录

| | |
|----------------------------------|-----|
| 1 绪论 | 1 |
| 1.1 卫星多普勒导航定位系统简介 | 1 |
| 1.2 GPS 卫星导航定位系统简介 | 3 |
| 1.3 GLONASS 卫星导航定位系统简介 | 10 |
| 1.4 GALILEO 卫星导航定位系统简介 | 12 |
| 1.5 北斗卫星导航定位系统简介 | 14 |
| 1.6 各种卫星导航定位系统比较 | 17 |
| 2 卫星大地测量基本知识 | 23 |
| 2.1 坐标系统 | 23 |
| 2.2 时间系统 | 30 |
| 2.3 卫星的无摄运动 | 32 |
| 2.4 卫星的受摄运动 | 37 |
| 2.5 GPS 卫星星历 | 40 |
| 3 GPS 信号结构与 GPS 接收机 | 45 |
| 3.1 GPS 卫星信号的基本结构 | 45 |
| 3.2 GPS 卫星导航电文 | 55 |
| 3.3 GPS 卫星位置和速度的计算 | 57 |
| 3.4 GPS 接收机的基本工作原理 | 63 |
| 4 GPS 定位的基本原理 | 70 |
| 4.1 伪距测量 | 70 |
| 4.2 载波相位测量 | 75 |
| 4.3 GPS 相对定位 | 80 |
| 4.4 周跳探测与修复 | 84 |
| 4.5 整周模糊度的确定 | 87 |
| 4.6 GPS 精密单点定位原理 | 95 |
| 5 差分 GPS 定位原理 | 99 |
| 5.1 位置差分原理 | 99 |
| 5.2 伪距差分原理 | 100 |
| 5.3 相位平滑伪距差分原理 | 101 |
| 5.4 广域差分 GPS 原理 | 103 |
| 5.5 载波相位差分原理 | 107 |
| 6 GPS 测量的误差来源及其影响 | 112 |
| 6.1 与卫星有关的误差 | 112 |
| 6.2 与信号传播有关的误差 | 114 |
| 6.3 与接收机有关的误差 | 120 |

| | | |
|-----------|------------------------|-----|
| 6.4 | 精密单点定位中需要考虑的误差 | 122 |
| 7 | GPS 测量控制网的设计与实施 | 125 |
| 7.1 | GPS 控制测量的概念及模式 | 125 |
| 7.2 | GPS 测量控制网的技术设计 | 127 |
| 7.3 | GPS 外业选点与埋石 | 133 |
| 7.4 | GPS 控制网施测前准备 | 136 |
| 7.5 | GPS 控制网的外业观测 | 139 |
| 7.6 | 观测成果的检核与重测 | 145 |
| 8 | GPS 测量的数据处理 | 148 |
| 8.1 | 数据处理的基本程序 | 148 |
| 8.2 | GPS 基线向量的解算 | 151 |
| 8.3 | GPS 定位结果的坐标转换 | 172 |
| 8.4 | 基线向量网平差 | 185 |
| 8.5 | GPS 测量技术总结 | 196 |
| 9 | CORS 系统与网络 RTK | 198 |
| 9.1 | CORS 系统概述 | 198 |
| 9.2 | CORS 系统建设 | 201 |
| 9.3 | 网络 RTK 概述 | 212 |
| 9.4 | VRS 原理 | 218 |
| 9.5 | CORS 系统与网络 RTK 技术的应用 | 225 |
| 10 | GPS 精密高程测量 | 231 |
| 10.1 | 高程系统简介 | 231 |
| 10.2 | 大气对流层折射影响及其处理方法 | 232 |
| 10.3 | GPS 高程转换方法概述 | 238 |
| 10.4 | 转换 GPS 高程的二次曲面拟合法 | 241 |
| 10.5 | 转换 GPS 高程的神经网络方法 | 246 |
| 10.6 | GPS 精密高程测量的应用 | 251 |
| 11 | GPS 工程应用 | 254 |
| 11.1 | GPS 在大地控制测量中的应用 | 254 |
| 11.2 | GPS 在变形监测中的应用 | 256 |
| 11.3 | GPS 在路线勘测中的应用 | 260 |
| 11.4 | GPS 在桥梁、隧道施工控制网中的应用 | 263 |
| 11.5 | GPS 在港口与航道建设中的应用 | 270 |
| 11.6 | GPS 在交通运输领域中的应用 | 275 |
| 11.7 | GPS 在摄影测量与遥感技术中的应用 | 280 |
| 11.8 | GPS 在农林业领域中的应用 | 283 |
| | 参考文献 | 287 |

1 绪 论

全球定位系统(Global Positioning System, 简称 GPS), 是随着现代科学技术的迅速发展而建立起来的新一代卫星导航定位系统。本章我们将主要介绍该系统的发展由来、系统的组成、系统的应用特点以及目前美国政府对利用 GPS 的限制性政策等内容。同时, 也对其他卫星导航定位系统进行简要介绍和比较。

1.1 卫星多普勒导航定位系统简介

1.1.1 NNSS 研制历程

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。从此之后, 世界各国争相利用人造卫星为军事、经济和科学文化等服务, 大地测量学也取得了惊人的发展, 迅速跨入了一个崭新的时代。

随着人造地球卫星的入轨运行, 利用卫星进行定位测量已成为现实, 从而产生了卫星大地测量学。卫星大地测量就是利用人造地球卫星为大地测量服务的一门学科。它的主要内容是在地面上观测人造卫星, 通过测定卫星位置的方法, 来解决大地测量的任务, 如测定地面点的相对位置和绝对位置, 测定地球的形状和大小以及地球引力场参数等。

在利用人造地球卫星进行测量的初期, 人造地球卫星仅仅作为一种空间的观测目标, 由地面上的测站对它进行摄影观测而测定地面点位, 此法称之为卫星三角测量, 它是卫星定位的低级阶段。

如图 1-1 所示, 在相距数千公里的 A、B 两个测站, 各安设一台卫星摄影机, 在晴朗的夜晚, 以恒星为背景, A、B 两个测站对同一颗人造地球卫星(下文简称卫星) S_1 进行同步摄影, 由此得到的摄影底片, 既有卫星 S_1 的影像 S_a 、 S_b , 又有某些恒星的影像; 从天文年历中查出有关恒星的坐标, 并在摄影底片上精确量测出卫星坐标, 依此推算出 A、B 测站至卫星 S_1 的方向 \vec{a}_{S_1} 、 \vec{b}_{S_1} , 从而获得一个同步平面 AS_1B 。在 A、B 测站对另一颗卫星 S_2 (或同一颗卫星的另一个位置) 再进行一次同步摄影, 又可推算出 A、B 测站至卫星 S_2 的方向 \vec{a}_{S_2} 、 \vec{b}_{S_2} , 得到另一个同步平面 AS_2B , 它与 AS_1B 平面的交线, 便是连接 A、B 测站的弦线 ab 。同理, 当 A、C 测站进行两次同步摄影时, 亦可求得连接 A、C 测站的弦线 ac 。若已知 A、C 测站的坐标, 则可求得待定点 B 的坐标; 如果 A、C 测站位于陆地上, B 测站处于远海岛屿上, 用上述卫星摄影观测的方法, 就可以实现大陆和海岛

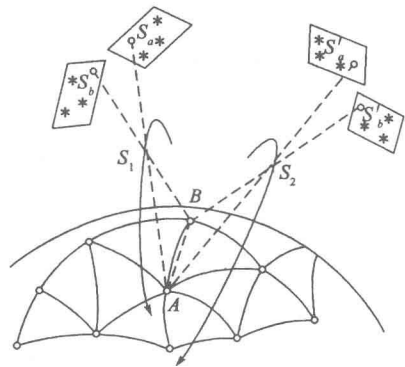


图 1-1 卫星三角测量

的联测定位,这是常规定位技术望尘莫及的。

1966年至1972年间,美国国家大地测量局在英国和联邦德国测绘部门的协作下,用上述卫星三角测量方法测设了一个具有45个测站的全球卫星三角网,获得了5m的点位精度。由于卫星三角测量受卫星可见条件及天气的影响,费时费力,定位精度又不甚理想,且不能得到点位的地心坐标。因此,卫星三角测量成为一种过时的观测技术,很快就被卫星多普勒定位所取代。

卫星多普勒定位已进入了卫星定位的高级阶段。此时,卫星不再作为一种单纯的空间观测目标,而是一种通过其轨道参数介入定位的动态已知点。观测方式从量测卫星方向转到测量地面测站至卫星的距离或距离差。

1958年12月,美国海军和霍普金斯(Hopkins)大学应用物理实验室,为了给北极星核潜艇提供全球性导航,开始研制一种卫星导航系统,称之为美国海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System)系统,简称为NNSS。1959年9月发射了第一颗试验性卫星,到1961年11月,先后共发射了9颗试验性导航卫星。经过几年的试验研究,解决了导航卫星的许多技术问题。1963年12月起,陆续发射了6颗工作卫星组成子午卫星星座,使得地球表面上任何一个测站上,平均每隔2h便可观测到其中一颗卫星。由于这些卫星的轨道均经过地球的南北极上空,故称为子午卫星。卫星高度在950~1200km之间,卫星运行周期约为107min,轨道近似于圆形。

1.1.2 NNSS 系统组成

卫星多普勒定位系统即美国海军导航卫星系统,它由三部分组成,除了以上围绕地球运行的子午卫星外,还有地面跟踪网以及用户接收机。地面跟踪网又由跟踪站、计算中心、注入站、海军天文台和控制中心五部分组成。它们的任务是测定各颗卫星的轨道参数,并定时将这些轨道参数和时间信号注入到相应的各颗卫星内,以便卫星按时向地面播发。接收机是用来接收卫星发射的信号,测量多普勒频移,译出卫星的轨道参数,以测定接收机所在位置的设备。由于这些接收机都是用多普勒效应原理进行接收和定位的,所以也称为多普勒接收机。

1.1.3 NNSS 主要特点

1967年7月29日,美国政府宣布解密子午卫星的部分电文供民间使用。自此以后,卫星多普勒定位技术迅速得到了广泛的应用。实践证明,卫星多普勒定位具有经济快速、精度较高、不受天气和时间限制等优点,只要能见到子午卫星,便可在地球表面上的任何地方进行单点定位或联测定位,从而获得测站的三维地心坐标。因此,世界上许多国家在七八十年代都引进卫星多普勒定位技术为本国服务。

1.1.4 我国应用 NNSS 概况

20世纪70年代中期,我国开始引进卫星多普勒接收机。西沙群岛的大地基准联测,是我国应用卫星多普勒定位技术的首例。自20世纪70年代后期以来,我国开展了几次较大规模的多普勒定位实践。例如,国家测绘局和总参测绘局于1979年开始联合测设的全国卫星多普勒大地网;由原武汉测绘科技大学(现武汉大学)与青海石油局、新疆石油局、石油部地球物理勘探局合作测设的西北地区卫星多普勒定位网;1987年开始测设的全国陆地海洋卫星定位网

以及 1985 年南极长城考察站的建站测量等。

卫星多普勒定位技术在我国经历了十多年的应用和发展历程,是卫星定位技术对我国常规定位技术形成的第一次历史性的冲击波。卫星定位的理论和技术的开始在大地测量工作者中普及,许多大地测量研究工作也转到了这个方向。我国在多普勒定位理论、数据处理、软件开发方面都取得了一批在当时已接近世界先进水平的成果,为我国卫星定位技术的发展打下了一个很好的基础。

卫星多普勒定位系统虽然在导航和定位技术方面前进了一大步,但仍然存在一些明显的缺陷,如该系统的卫星数目较少(5~6 颗),运行轨道高度较低(平均约 1 000km),从地面站观测到卫星的时间间隔较长(平均约 1.5h),无法进行全球性的实时连续导航定位,且其精度还不够理想(采集 2 天以上的定位数据,可以达到分米级的定位精度),因此其应用受到了很大的限制。为了实现全天候、全球性和高精度的连续导航和定位,第二代卫星导航系统——GPS 全球定位系统便应运而生。

1.2 GPS 卫星导航定位系统简介

1.2.1 GPS 研制历程

美国国防部在总结了 NNSS 的优劣以后,1973 年 12 月批准研制新一代的卫星导航系统——导航卫星定时测距全球定位系统(Navigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System),简称 GPS 系统。它可以向全球数目不限的用户连续地提供高精度的全天候三维坐标、三维速度以及时间信息,因而广泛地应用于飞机、船舶和各种载运工具的导航,高精度的大地测量,精密工程测量,地壳形变监测,地球物理测量,海空救援,水文测量,近海资源勘探,航天发射及卫星回收等技术领域。

自 1974 年以来,GPS 系统的建立经历了方案论证、系统研制和生产试验等三个阶段,总投资超过 200 亿美元,这是继阿波罗计划、航天飞机计划之后的又一庞大的空间计划。1978 年 2 月 22 日,第一颗 GPS 试验卫星发射成功;1989 年 2 月 14 日,第一颗 GPS 工作卫星发射成功,宣告 GPS 系统进入了生产作业阶段;1994 年全部完成 24 颗工作卫星(含 3 颗备用卫星)的发射工作。GPS 系统与 NNSS 系统的主要特征见表 1-1。

GPS 与 NNSS 的主要特征

表 1-1

| 项 目 | GPS 系统 | NNSS 系统 |
|-------------|---------------------|----------|
| 载波频率(MHz) | 1 227. 60,1 575. 42 | 150.400 |
| 轨道高度(km) | 20 200 | 1 000 |
| 卫星数目(颗) | 24(3 颗备用) | 5~6 |
| 卫星运行周期(min) | 720 | 107 |
| 卫星钟 | 铯钟、铷钟 | 石英钟 |
| 定位方式 | 测距 | 测定多普勒频移 |
| 可用性 | 连续、实时 | 15~20min |

GPS 系统的出现,使卫星定位技术发展到了一个辉煌的历史阶段。

1.2.2 GPS 系统组成

GPS 系统由以下三大部分组成:

- (1)空间星座部分:包括 GPS 工作卫星和备用卫星;
- (2)地面监控部分:控制整个系统和时间,负责轨道监测和预报;
- (3)用户设备部分:主要是各种型号的接收机。

1.2.2.1 空间星座部分

全球定位系统的空间卫星星座由 21 颗工作卫星和 3 颗随时可以启用的备用卫星所组成。如图 1-2 所示,24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道面内,每个轨道面均匀分布有 4 颗卫星。卫星轨道平面相对地球赤道面的倾角均为 55° ,各轨道平面升交点的赤经相差 60° ,在相邻轨道上,卫星的升交距角相差 30° 。轨道平均高度约为 20 200km,卫星运行周期为 11 小时 58 分。因此,同一观测站上,每天出现的卫星分布图形相同,只是每天提前约 4min。地面观测者见到地平面上的卫星颗数随时间和地点的不同而异,最少为 4 颗,最多可达 11 颗。

目前 GPS 系统已经建成,其工作卫星在空间的分布保障了在地球上任何时刻、任何地点均至少可以同时观测到 4 颗卫星,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。

空间部分的 3 颗备用卫星,将在必要时根据指令代替发生故障的卫星,这对于保障 GPS 空间部分正常而高效地工作是极其重要的。

迄今为止,GPS 卫星已设计了三代,分别为 BlockI、BlockII、BlockIII。第一代(BlockI)卫星,用于全球定位系统的实验,通常称为 GPS 实验卫星。这一代卫星共研制和发射了 11 颗,实验卫星设计寿命为 5 年,现已停止工作。第二代(BlockII)卫星,用于全球定位系统的正式工作,称为 GPS 工作卫星。第二代卫星共研制和发射了 28 颗,卫星的设计寿命为 7.5 年,于 1994 年发射完毕。第三代(BlockIII)卫星,于 20 世纪 90 年代末期开始陆续发射,数量约为 20 颗,以取代第二代卫星,用于改善全球定位系统。

图 1-3 是 GPS 工作卫星的外形结构。主体呈圆柱形,直径约为 15m,重约 774kg(包括 310kg 燃料),星体两侧各伸出一块由四叶拼成的太阳能电池翼板,其面积为 72m^2 ,能自动对准太阳,以保证卫星正常工作用电。卫星姿态调整采用三轴稳定方式,使螺旋天线阵列所辐射的波速对准卫星的可见地面。

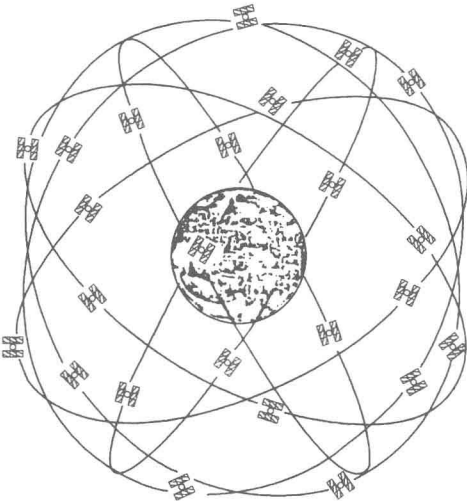


图 1-2 GPS 卫星星座

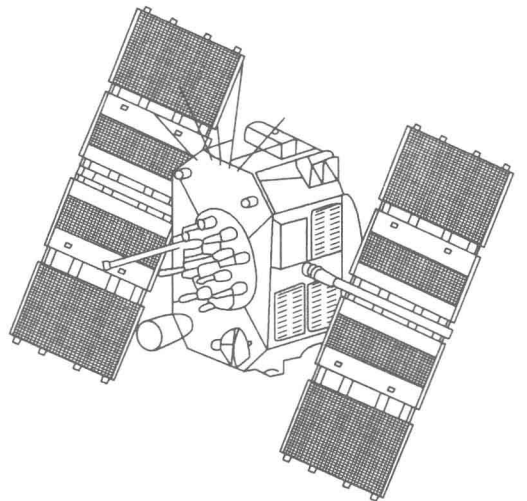


图 1-3 GPS 卫星构造示意图

在 GPS 系统中, GPS 卫星的作用是:

- (1)向广大用户连续发送定位信息;
- (2)接收和储存由地面监控站发来的卫星导航电文等信息,并适时地发送给广大用户;
- (3)接收并执行由地面监控站发来的控制指令,适时地改正运行偏差或启用备用卫星等;
- (4)通过星载的高精度铷钟和铯钟,提供精密的时间标准。

GPS 卫星的核心部件是高精度的时钟、导航电文存储器、双频发射和接收机以及微处理机,而对于 GPS 定位成功的关键在于高稳定度的频率标准。这种高稳定度的频率标准由高精度的原子钟提供,因为 10^{-9} s 的时间误差将会引起 30cm 的站心距离误差。为此,每颗 GPS 工作卫星一般安设 2 台铷原子钟和 2 台铯原子钟,并计划未来采用更稳定的氢原子钟(其频率稳定度优于 10^{-14} s)。GPS 卫星虽然发送几种不同频率的信号,但是它们均源于一个基准信号(其频率为 10.23GHz),所以只需启用一台原子钟,其余作为备用。卫星钟由地面站检验,其钟差、钟速连同其他信息由地面站注入卫星后,再转发给用户设备。

1.2.2.2 地面监控部分

为了确保 GPS 系统的良好运行,地面监控系统发挥了极其重要的作用。其主要任务是:监视卫星的运行;确定 GPS 时间系统;跟踪并预报卫星星历和卫星钟状态;向每颗卫星的数据存储器注入卫星导航数据。

地面监控部分包括一个主控站、三个注入站和五个监测站,其分布如图 1-4 所示。



图 1-4 GPS 卫星的地面监控系统

(1)主控站

主控站设在美国本土科罗拉多州的空间联合执行中心。除负责管理和协调整个地面监控系统的工作外,其主要任务是根据本站和其他监测站的所有跟踪观测数据,计算各卫星的轨道参数,钟差参数以及大气层的修正参数,编制成导航电文并传送至各注入站;主控站还负责调整偏离轨道的卫星,使之沿预定轨道运行,必要时启用备用卫星以代替失效的工作卫星。

(2)监测站

监测站是在主控站控制下的数据自动采集中心。全球共有 5 个监测站,分布美国本土和

三大洋的美军基地上。主要任务是为主控站提供卫星的观测数据。每个监测站均用 GPS 接收机对可见卫星进行连续观测,以采集数据和监测卫星的工作状况,所有观测数据连同气象数据传送到主控站,用以确定卫星的轨道参数。

(3)注入站

三个注入站分别设在南大西洋的阿松森群岛、印度洋的狄哥伽西亚岛和南太平洋的卡瓦加兰岛。其主要任务是将主控站发来的导航电文注入到相应卫星的存储器,每天注入 3~4 次。此外,注入站能自动向主控站发射信号,每分钟报告一次自己的工作状态。全球共有 3 个地面天线站,分别与 3 个监测站重合。

整个 GPS 的地面监控部分,除主控站外均无人值守。各站间用现代化的通信网络联系起来,在原子钟和计算机的精确控制下,各项工作实现了高度的自动化和标准化。

1.2.2.3 用户设备部分

GPS 用户设备部分主要包括:GPS 接收机及其天线,微处理器及其终端设备以及电源等。而其中接收机和天线,是用户设备的核心部分,一般习惯上统称为 GPS 接收机。

根据接收机的结构,可分为天线单元和接收单元两大部分。一般将两个单元分别装备成两个独立的部件,观测时将天线单元置于测站上,接收单元置于测站附近适当的地方,两者之间用电缆线联成一个整机。也有的将天线单元和接收单元制成一个整体,观测时将其安置在测站点上。

(1)天线单元

它由接收天线和前置放大器两个部分组成。接收天线大多采用全向天线,可接收来自任何方向的 GPS 信号,并将电磁波能量转化为变化规律相同的电流。前置放大器可将极微弱的 GPS 信号电流予以放大。

(2)接收单元

信号波道和微处理机构成接收单元的核心部件。从目前的测地型接收机来看,主要有平方型和相关型两种信号波道,所具有的波道数目从 1~24 个不等。利用多个波道同时对多个卫星进行观测,实现快速定位。微处理机具有各种数据处理软件,能选择合适的卫星进行观测,以获得最佳的几何图形;能根据观测值及卫星星历进行平差计算,求得所需的定位信息。

数据记录器用来记录接收机所采集的定位数据,以供测后数据处理之用,目前多用固态存储器取代了以前的磁带记录器。

GPS 信号接收机的电池,一般采用机内机外两种直流电源。设置机内电池的目的在于更换外接电池时可以不中断连续观测。当机外电池电压低到某一数值,会自动接通机内电池,当使用机外电池观测时,机内电池能自动地被充电,关机后,机内电池为 RAM 存储器供电,以防止数据丢失。

视屏监视器一般包括一个显示窗和一个操作键盘,它们均设在接收单元的面板上,观测者通过键盘操作,可从显示窗上读取数据和文字。如查询仪器的工作状态,检核输入数据的正误等。

综上所述,接收机的主要功能是:能迅速捕获按一定卫星截止高度角所选择的待测卫星信号,并跟踪这些卫星的运行,对所接收到的卫星信号进行变换、放大和处理,以便测定出 GPS 信号从卫星到接收天线的传播时间,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坐标、三维速度和时间等所需数据。

随着 GPS 定位技术的迅速发展以及应用领域的不断开拓,世界各国对 GPS 接收机的研制与生产都极为重视,目前世界上 GPS 接收机的生产厂家约有数百家,型号超过数千种,而且越来越趋于小型化,便于外业观测。我国南方测绘仪器公司也于 1991 年跨入了 GPS 接收机的生产行列。

应当指出:GPS 接收机作为一个用户测量系统,除了应具有接收机、天线和电源等硬件设备外,其软件部分也是构成现代 GPS 测量系统的重要组成部分。一般来说,软件包括内软件和外软件。所谓内软件是指诸如控制接收机信号通道,按时序对各卫星信号进行量测的软件以及内存或固化在中央处理器中的自动操作程序等。这类软件已和接收机融为一体。而外软件主要是指观测数据后处理的软件系统。一个功能齐全、品质优良的软件不仅能方便用户使用,满足用户的多方面要求,而且对于改善定位精度,提高作业效率和开拓新的应用领域都具有重要意义。所以软件的质量和功能已成为反映现代 GPS 测量系统先进水平的一个重要标志。有关接收机的详细介绍可参看相应的仪器说明书。

1.2.3 GPS 主要特点

GPS 作为一种导航和定位系统,以其高精度、全天候、高效率、多功能、易操作、应用广等特点著称。

(1) 定位精度高

大量的实践和研究表明,用载波相位观测测量进行静态相对定位,在小于 50km 的基线上,目前达到的典型精度为 1ppm,而在 100~500km 的基线上可达 0.1ppm。随着观测技术与数据处理方法的不断优化,在大于 1000km 的距离上,相对定位精度可达到 0.01ppm,其精度是惊人的。

在实时动态定位(RTK)和实时差分定位(RTD)方面,定位精度也有了显著性的突破,目前可分别达到厘米级和分米级的定位精度,能满足各种工程测量的要求。

(2) 观测时间短

随着 GPS 系统的不断完善,软件水平的不断提高,观测时间已由以前的几小时缩短至现在的几十分钟,甚至几分钟。目前采用静态相对定位模式,观测 20km 以内的基线所需观测时间,对于双频接收机仅需 15~20min;采用快速静态相对定位模式,当每个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;采取实时动态定位模式,流动站出发时观测 1~2min 进行动态初始化,然后可随时定位,每站观测仅需几秒钟。因而用 GPS 技术建立控制网,可以大大提高作业效率。

(3) 测站间无需通视

经典测量技术均有严格的通视要求,必须建造大量的觇标,这给经典测量的实施带来了相当的困难。GPS 测量只要求测站上空开阔,与卫星间保持通视即可,不要求测站之间互相通视,因而不需要建造觇标。这一优点既可大大减少测量工作的经费和时间(一般造标费用约占总经费的 30%~50%),同时也使选点工作变得非常灵活,完全可以根据工作的需要来确定点位位置,也可省去经典测量中的传算点、过渡点的测量工作。

(4) 仪器操作简便

随着 GPS 接收机的不断改进,GPS 测量的自动化程度越来越高,有的已趋于“傻瓜化”。在观测中测量员的主要任务只是安置仪器,连接电缆线,量取天线高和气象数据,监视仪器的工作状态,而其他观测工作,如卫星的捕获,跟踪观测和记录等均由仪器自动完成。结束测量

时, 仅需关闭电源, 收好接收机, 便完成了野外数据采集任务。

如果在一个测站上需作较长时间的连续观测, 有的接收机还可以实行无人值守的数据采集, 通过数据通讯方式, 将所采集的数据传送到数据处理中心, 实现全自动化的数据采集与处理。另外, 现在的接收机体积也越来越小, 相应的重量也越来越轻, 使得携带和搬运都很方便, 极大地减轻了测量工作者的劳动强度, 也使野外测量工作变得轻松愉快。

(5) 全球全天候定位

GPS 卫星的数目较多, 且分布均匀, 保证了全球地面连续覆盖。使得地球上任何地方的用户在任何时间至少可以同时观测到 4 颗 GPS 卫星, 可以进行全球全天候的观测工作。一般除打雷闪电天气不宜观测外, 其他天气(如阴雨下雪、起风下雾等)均不受影响, 这是经典测量手段望尘莫及的。

(6) 可提供全球统一的三维地心坐标

经典大地测量将平面与高程采用不同方法分别施测, 而 GPS 测量可同时精确测定观测站平面位置和大地高程。目前 GPS 水准可满足四等水准测量的精度, GPS 测量的这一特点, 不仅为研究大地水准面的形状和确定地面点的高程开辟了新途径, 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。

另外, GPS 定位是在全球统一的 WGS-84 坐标系统中计算的, 因此全球不同地点的测量成果是相互关联的。

(7) 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, 它不仅广泛地用于海上、空中和陆地运动目标的导航, 而且在运动目标的监控与管理, 以及运动目标的报警与救援等方面, 也已获得成功地应用; 在测量方面, 这一定位技术在大地测量、工程测量与变形监测、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 系统不仅用于测量和导航, 还可广泛用于交通、气象、农林等众多相关领域。

1.2.4 GPS 现代化简介

GPS 建成之初, 工作卫星主要有 9 颗 BLOCK II 型卫星和 15 颗 BLOCK IIA 型卫星。时至今日, GPS 已经经历了两代的更替, 是目前运营最为成熟的全球导航定位系统, 共有 31 颗卫星在轨运行, 其中 4 颗为备用星。在轨卫星主要由 13 颗 GPS IIA 卫星, 12 颗 GPS IIR 卫星和 6 颗 GPS IIR-M 卫星组成。此外, GPS 星座更新计划还包括计划发射 12 颗 GPS IIF 卫星来代替已有的卫星星座。GPS IIF 卫星与之前的卫星系列相比, 在 1176.45MHz 的频段上增加了第三个民用信号 L5, 这也是 GPS 二代向 GPS 三代过渡的最后型号。但是, 由于合同商在 GPS IIF 卫星的建造过程中缺少专业技术, 缺乏项目监管, 还存在技术问题。首颗 GPS IIF 卫星已经于 2010 年 5 月 20 日由 Delta-5 火箭发射, 比原计划推迟了三年半, 第二颗已于 2010 年底发射。

GPS 正在计划由二代向三代过渡, 目前已完成了系统结构与需求定义, 计划于 2014 年到 2022 年间部署, 以满足未来 30 年的定位需求。第三代 GPS 拟将现有的 6 个轨道减少为 3 个轨道, 采用 30 颗卫星组网, 其中包括 8 颗 GPS-3A 卫星, 8 颗 GPS-3B 卫星和 16 颗 GPS-3C 卫星。在卫星地面站部分, GPS 三代增加了一个新的主控站, 监测站增加到 6 个, 并将美国国家地理情报局(NGA)的 11 个监测站纳入到空军监测网。此外, GPS 正在发展星际横向数据链技术, 以便万一主控站被毁后 GPS 卫星可以独立运行。