



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
教育部高等学校高职高专测绘类专业教学指导委员会组织编写

GPS定位测量

(第2版)

周建郑 主编 陶本藻 丁仕俊 主审



黄河水利出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
教育部高等学校高职高专测绘类专业教学指导委员会组织编写

GPS 定位测量

(第2版)

主 编 周建郑
副主编 张玉堂 纪 勇 原小利
主 审 陶本藻 丁仕俊

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,由教育部高等学校高职高专测绘类专业教学指导委员会组织编写。全书共分10章,主要内容有:绪论,GPS定位的坐标系统和时间系统,GPS定位系统与GPS信号,GPS定位的基本原理,GPS定位误差的来源及其影响,GPS定位测量的设计与实施,GPS控制网的数据处理,GPS实时动态定位原理,GPS接收机的选择和使用,GPS在国民经济建设中的应用等。

本书主要供高职高专院校工程测量、矿山测量、建筑工程技术、水利水电工程、摄影测量与遥感技术、地籍测量与土地管理、工程地质等专业教学使用,也可作为从事以上专业的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

GPS定位测量/周建郑主编. —郑州:黄河水利出版社,2010.10

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-80734-908-2

I. ①G… II. ①周… III. ①全球定位系统(GPS) - 测量 - 高等学校:技术学校 - 教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第185240号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940 传真:0371-66022620

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:16.5

字数:399千字

印数:4 101—8 200

版次:2005年7月第1版

印次:2010年10月第2次印刷

2010年10月第2版

定价:29.00元

教育部高等学校高职高专测绘类专业教学指导委员会
规划教材审定委员会

名誉主任 宁津生

顾问 陶本藻 王 依

主任 赵文亮

副主任 李生平 李骏元 韩力援

委员 邹自力 陈传胜 黄华明 邹晓军 张晓东

李天和 靳祥升 薄志义 全志强 张保民

王根虎 周 园 李青海 赵 敏 张彦东

张东明

序

我国的高职高专教育经历了十余年的蓬勃发展,获得了长足的进步,如今已成为我国高等教育的重要组成部分,在国家的经济、社会 and 科技发展中发挥着积极的服务作用,测绘类专业的高职高专教育也是如此。为了加深高职高专教育自身的改革,并使其高质量地向前发展,教育部决定组建高职高专教育的各学科专业指导委员会。国家测绘局受教育部委托,负责组建和管理高职高专教育测绘类专业指导委员会,并将其设置为高等学校测绘学科教学指导委员会下的一个分委员会。第一届分委员会成立后的第一件事就是根据教育部的要求,研讨和制定了我国高职高专教育的测绘类专业设置,新设置的专业目录已上报教育部和国家测绘局。随后组织委员和有关专家按照新的专业设置制订了“十五”期间相应的教材规划。在广泛征集有关高职高专院校意见的基础上,确定了规划中各本教材的主编和参编院校及其编写者,并规定了完成日期。为了保证教材的学术水平和编写质量,教学指导分委员会还针对高职高专教材的特点制定了严格的教材编写、审查及出版的流程 and 规定,并将其纳入高等学校测绘学科教学指导委员会统一管理。

经过各相关院校编写教师们的努力,现在第一批规划教材正式出版发行,其他教材也将陆续出版。这些规划教材鲜明地突出了高职高专教育中专业设置的职业性和教学内容的应用性,适应高职高专人才的职业需求,必定有别于高等教育的本科教材,希望在高职高专教育的测绘类专业教学中发挥很好的作用。

这里要特别指出,黄河水利出版社在获悉我们将出版一批规划教材后,为了支持和促进测绘类专业高职高专教育的发展,经与教学指导委员会协商,今后高职高专测绘类专业的全部规划教材都将由该社统一出版发行。这里谨向黄河水利出版社表示感谢。

由教学指导委员会按照新的专业目录,组织、规划和编写高职高专测绘类专业教材还是初次尝试,希望有测绘类专业的各高职高专院校能在教学中使用这些规划教材,并从中发现问题,提出建议,以便修改和完善。

高等学校测绘学科教学指导委员会主任

中国工程院院士



2005年7月10日于武汉

再版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是根据《国务院关于大力发展职业教育的决定》、教育部《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》等文件精神,以及教育部对普通高等教育“十一五”国家级规划教材建设的具体要求组织编写的。

本书是在 2005 年版《GPS 定位原理与技术》基础上修订的而成的,为了更好地体现教材特色、体现 GPS 技术发展趋势,我们对再版教材部分章节进行了调整,主要调整内容如下:

- (1)为使教材更接近教学与工程实际,删去了天球坐标系的内容;
- (2)删除了第四章 GPS 动态定位原理内容,改在第八章中进行集中介绍;
- (3)在对各章进行原理介绍或粗象说明的部分,重新梳理了内容,使简明扼要,便于学生理解;
- (4)将第八章 GPS 实时动态定位原理是重新编写,增加 PTK 作业过程、RTK 控制测量与工程放样,地形测量与连续运行参考站的内容。

总之,希望调整后的体系更能适合高职教学的需求,体现“必需、够用”的原则。

本教材主要是为了满足高职高专院校工程测量技术、摄影测量与遥感技术、地理信息系统与地图制图技术、地籍测量与土地管理、矿山测量、水利水电工程、工程监理、道路与桥梁工程技术、建筑工程技术、工程地质、水文地质、给水排水工程技术等专业的教学使用,也能适应其他相关专业教学及岗位培训的需要,并可供从事以上专业的技术人员参考。

本书编写人员及编写分工如下:第一章、第二章由黄河水利职业技术学院陈琳和黄河水利委员会水文局赵新生编写,第三章、第四章由黄河水利委员会水资源管理与调度局原小利、黄河水利职业技术学院陈慧编写,第五章、第六章由黄河水利职业技术学院周建郑编写,第七章、第八章由黄河水利职业技术学院郭玉珍、湖北国土资源职业学院张玉堂编写,第九章、第十章由黄河水利职业技术学院纪勇编写,附录一由开封市规划勘测设计研究院李智祥编写,附录二由黄河勘测规划设计有限公司测绘信息工程院曹天一编写。全书由周建郑教授担任主审并负责统稿。在本书编写过程中,得到了编写者所在单位的大力支持,在此一并致谢。

武汉大学测绘学院陶本藻教授和丁仕俊教授审阅了本教材,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

2010 年 6 月

前 言

本书是根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》等文件精神,以及由全国水利水电高职教研会拟定的教材编写规划,报水利部批准,用中央财政安排的“支持示范性职业技术学院建设”项目经费组织编写的水利水电类全国统编教材。

全球卫星定位系统是美国从 20 世纪 70 年代开始研制的,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。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,对培养学生的专业和岗位能力具有重要的作用。

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。

本教材主要是为了满足高职高专院校工程测量、摄影测量、地理信息系统、地籍测量与土地管理、水利水电工程、工程监理、道路与桥梁、工业与民用建筑、工程地质、水文地质、给水排水等专业的教学使用,也能适应其他相关专业教学及岗位培训的需要,并可供从事以上专业的技术人员参考。

本书编写人员及编写分工如下:黄河水利职业技术学院赵杰(第一章,第十章)、纪勇(第二章,第四章第一、二节),湖北水利水电职业技术学院聂琳娟(第三章),华北水利水电学院水利职业学院刘世祥(第四章第三、四节,第五章第一~三节),黄河水利职业技术学院周建郑(第五章第四、五节,第六章),山西水利职业技术学院杜玉柱(第七章),杨凌职业技术学院赵飞燕(第八章),广西水利电力职业技术学院陆鹏(第九章)。周建郑任主编,纪勇、聂琳娟、赵杰任副主编。全书由周建郑统稿。在本书编写过程中,得到了黄河水利出版社和编写者所在单位的大力支持,在此一并致谢。

武汉大学测绘学院博士丁仕俊教授审阅了本教材,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 10 月

目 录

序

宁津生

再版前言

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 GPS 全球卫星定位系统及其星座	(1)
第二节 我国的北斗卫星导航定位系统	(3)
第三节 GPS 航天飞机测图系统	(7)
第四节 我国的 GPS 卫星跟踪网	(8)
第五节 我国的 A、B 级 GPS 大地控制网	(9)
思考题与习题	(11)
第二章 GPS 定位的坐标系统和时间系统	(12)
第一节 参心坐标系	(12)
第二节 地心坐标系	(17)
第三节 时间系统	(22)
思考题与习题	(27)
第三章 GPS 定位系统与 GPS 信号	(28)
第一节 GPS 定位系统的组成	(28)
第二节 卫星的运行及其轨道	(34)
第三节 卫星星历与卫星位置计算	(38)
第四节 GPS 卫星信号	(41)
第五节 GPS 信号的接收	(43)
思考题与习题	(48)
第四章 GPS 定位的基本原理	(49)
第一节 GPS 定位概述	(49)
第二节 伪距定位法	(54)
第三节 载波相位测量	(59)
思考题与习题	(64)
第五章 GPS 定位误差的来源及其影响	(65)
第一节 GPS 测量的主要误差分类	(65)
第二节 与卫星有关的误差	(66)
第三节 卫星信号传播误差	(69)
第四节 接收设备误差与图形强度	(76)
第五节 整周跳变分析与整周未知数的确定	(78)
思考题与习题	(82)

第六章 GPS 定位测量的设计与实施	(83)
第一节 建立 GPS 控制网的技术依据	(83)
第二节 GPS 定位网的布设	(87)
第三节 GPS 定位网的测设方案	(98)
第四节 外业观测	(103)
第五节 观测成果的外业检核及处理	(111)
思考题与习题	(115)
第七章 GPS 控制网的数据处理	(116)
第一节 观测数据的预处理	(116)
第二节 GPS 基线向量的解算	(121)
第三节 GPS 基线向量网独立平差	(126)
第四节 坐标系统的转换	(128)
第五节 GPS 网与地面网的三维平差	(135)
第六节 GPS 网与地面网的二维平差	(142)
第七节 GPS 的高程计算	(149)
思考题与习题	(152)
第八章 GPS 实时动态定位原理	(153)
第一节 RTK 概述	(153)
第二节 RTK 仪器架设与配置	(158)
第三节 RTK 作业过程	(164)
第四节 RTK 控制测量	(172)
第五节 RTK 地形测量	(177)
第六节 RTK 工程放样	(178)
第七节 GPS 网络 RTK 技术	(180)
第八节 连续运行参考站	(182)
思考题与习题	(187)
第九章 GPS 接收机的选择和使用	(188)
第一节 测地型接收机的类型选择	(188)
第二节 测地型 GPS 信号接收机简介	(192)
第三节 导航型 GPS 信号接收机	(202)
思考题与习题	(212)
第十章 GPS 在国民经济建设中的应用	(213)
第一节 GPS 在大地测量中的应用	(213)
第二节 GPS 在工程测量中的应用	(214)
第三节 GPS 在航空摄影测量中的应用	(215)
第四节 GPS 在高速铁路中的应用	(216)
第五节 GPS-RTK 在地形、地籍及房地产测量中的应用	(222)
第六节 GPS 在水下地形测量中的应用	(223)
第七节 GPS 在其他领域中的应用	(224)

思考题与习题	(225)
附录1 ××市 GPS 三等平面控制网测量技术设计书	(226)
附录2 Trimble Geomatics Office (TGO) 软件的使用	(231)
参考文献	(247)

第一章 绪 论

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行,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:

- (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,除显示了现代武器和现代其他科学技术的巨大优越性外,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。

第一节 GPS 全球卫星定位系统及其星座

1973 年 12 月,为了满足全球战略的需要,美国国防部组织陆、海、空三军十多个单位共同组成联合计划办公室。在联合计划办公室的领导下,吸取其空军提出的“621—B”计划和海军提出的“TIMATION”计划的优点,共同研制了 Navigation by Satellite Timing And Ranging/Global Positioning System(缩写成 NAVSTAR/GPS),即导航卫星测时和测距/全球定位系统,简称 GPS 定位系统,或直接简写为 GPS。

GPS 工作卫星(BLOCK II/IIA)的外形如图 1-1 所示,卫星发射进入轨道后,星体两侧各伸展出由 4 叶拼成的太阳能电池翼板,总面积为 7.2 m^2 。两侧翼板能自动对太阳定向,给 3 组 15 A 的镉镍蓄电池不断充电,保证了卫星在地影区也能正常工作。GPS 工作卫星的主体呈圆柱形,直径为 1.5 m,整体在轨质量为 843.68 kg,比试验卫星增重了 45%,它的设计寿命为 7.5 年,事实上均能超过该设计寿命而正常工作。GPS 卫星采用的是螺旋形天线阵列和圆极化式发送射电信号,12 根螺旋形天线组成了天线阵列,其发射波束的张角大约为 30° ,可以覆盖卫星的可见地面。除上述部分外,卫星还包

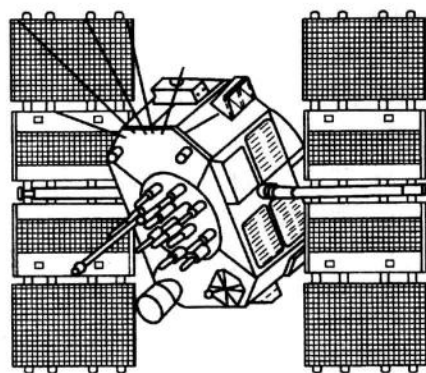


图 1-1 GPS 工作卫星

括入轨动力、反作用控制、姿态和速度控制系统、遥测和指令系统及导航信号发送系统等。卫星姿态是采用三轴稳定方式,由四个斜装惯性轮和喷气控制装置构成三轴稳定系统,使螺旋天线阵列所辐射的波速对准卫星的可见地面。

GPS 定位是一种被动定位,必须建立高稳定的频率标准。因此,每颗卫星上都必须安装高精确度的时钟。当有 1×10^{-9} s 的时间误差时,将引起 30 cm 的距离误差。试验表明,一般原子钟能够提供高稳定的频率。氢原子频率标准的稳定性最好,在 100 s 至 1 d 的时间内,氢原子频率标准的稳定优于 1×10^{-14} s,比石英晶体频率标准要高出两个数量级以上。所以,在每一个 GPS 工作卫星中,一般都要设置两台铷原子钟和两台铯原子钟,并计划将来采用氢原子钟。虽然 GPS 卫星发送几种不同频率的信号,但都来自同一个基准频率 10.23 MHz。所以,只需启用一台原子钟,其余的作为备用,以备更替出现故障的时钟。

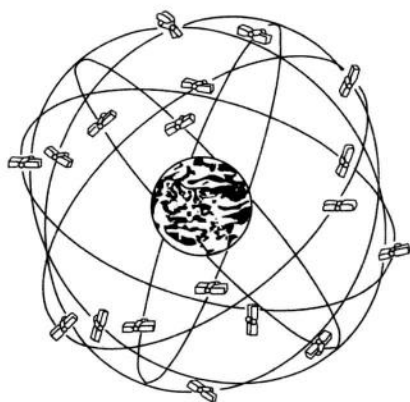


图 1-2 GPS 卫星星座

在 1988 ~ 1994 年间所建成的全球定位系统,包括 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星,它们所组成的 GPS 卫星工作星座如图 1-2 所示。24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内,每个轨道面内有 4 颗卫星运行,卫星距地面的平均高度为 20 200 km。6 个轨道面相对于地球赤道面的倾角为 55° ,各轨道面之间的交角为 60° ,运行速度为 3 800 m/s,每颗卫星可覆盖全球 38% 的面积。当地球自转 360° 时,卫星绕地球运行两圈,环绕地球运行一圈的时间为 11 h 58 min。地面的观测者每天可提前 4 min 见到同一颗卫星,从地平线升起至没落,用户可见到

卫星的时间约为 5 h。这样,观测者在地球表面上任何地点任何时刻,在卫星高度角 15° 以上,平均可同时观测到 6 颗卫星,最多可观测到 11 颗卫星,用以测定它的实时点位和其他状态参数。例如,在我国北纬 $34^\circ 48'$ 、东经 $114^\circ 28'$,一天内能够看到的 GPS 卫星数,全天有 50% 的时间,能够看到 7 颗 GPS 卫星;有 30% 的时间,能够看到 6 颗 GPS 卫星;有 15% 的时间,能够看到 8 颗 GPS 卫星;有 5% 的时间,能够看到 5 颗 GPS 卫星。这表明,在我国境内全天能够见到 5 ~ 8 颗 GPS 卫星,利于我国用户进行连续不断的导航定位测量。

2000 年 5 月 1 日,美国政府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。

GPS 全球定位系统可满足各种不同用户的需要,从根本上解决了人类可在地球的任何位置进行导航和定位的问题。在海上,可用于海上协同作战、海洋交通管理、石油勘探、海洋捕鱼、浮标建立、管道铺设、暗礁定位、海港领航等方面;在空中,可用于飞机导航、飞机会合、空中加油、武器投掷和空中交通管理等;在陆地上,可用于各种部队的定位、各种军事设施和其他设施的定位等;在空间技术方面,可用于导弹、飞船、飞机的导航和定位等;在人们的生活中,如汽车、旅游、摄影、探险、狩猎、捕鱼、农业生产等都可方便地使用。

近期,美国为了进一步改善 GPS 的可用性、安全性和完善性,实时推出了 GPS 现代化的计划,即实施广域增强系统和局域增强系统,进一步提高民用精度,先在 GPS 卫星上提供了第一个民用频率 1 575.42 MHz,2003 年提供了第二个民用频率 1 227.60 MHz,2006 年增加

第三个民用频率 1 176.45 MHz,并提高码频率和发射功率,其目的是和其他全球定位系统争夺市场。第四代 GPS 卫星——BLOCK III 正在研制中,预计 2010 年发射第一颗卫星,BLOCK III 卫星除具有现有 GPS 卫星的全部功能外,旨在提高目标定位精度和大大增强抗干扰能力,目标定位精度要求达到:水平精度 0.5 m,垂直精度 1 m。另外,在军事、矿藏、城市规划等方面有所增强。

综上所述,GPS 导航定位系统的特点如下:

(1)定位精度高。应用实践证明,GPS 相对定位精度在 50 km 以内可达 10^{-6} ,100 ~ 500 km 可达 10^{-7} ,1 000 km 以上可达 10^{-9} 。在 300 ~ 1 500 m 的工程精密定位中,1 h 以上观测的解,其平面位置误差小于 1 mm,与 ME-5000 电磁波测距仪测定的边长比较,其边长较差最大为 0.5 mm,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,软件的不断更新,目前 20 km 以内的相对静态定位仅需 15 ~ 20 min;快速静态相对定位测量时,当每个流动站与基准站相距在 15 km 以内时,流动站观测时间只需 1 ~ 2 min;动态相对定位测量时,流动站出发时观测 1 ~ 2 min,然后可随时定位,每站观测仅需几秒钟。

(3)测站间无需通视。GPS 测量不要求测站之间互相通视,只需测站上空开阔即可,因此可节省大量的造标费用。由于无需点间通视,点位位置根据需要可稀可密,使选点工作甚为灵活,也可省去经典大地网中的传算点、过渡点的测量工作。

(4)可提供三维坐标。经典大地测量将平面与高程采用不同方法分别施测。GPS 可同时精确测定测站点的三维坐标。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 接收机的不断改进,自动化程度越来越高;接收机的体积越来越小,质量越来越轻,极大地减轻了测量工作者的工作紧张程度和劳动强度,使野外工作变得轻松愉快。

(6)全天候作业。目前,GPS 观测可在一天内的任何时间进行,不受阴天黑夜、起雾刮风、下雨下雪等气候的影响。但雷雨天气不要进行 GPS 观测,要注意防雷电。

(7)功能多,应用广。GPS 系统不仅可用于测量、导航,还可用于测速、测时,其应用领域不断扩大。测速的精度可达 0.1 m/s,测时的精度可达几十毫微秒。

第二节 我国的北斗卫星导航定位系统

我国自行研制的第一颗导航定位卫星——北斗导航试验卫星(北斗一号),于 2000 年 10 月 31 日 0 时 02 分在西昌卫星发射中心发射升空,并准确进入预定轨道。2000 年 12 月 21 日 0 时 20 分,我国自行研制的第二颗北斗导航试验卫星,在西昌卫星发射中心发射升空,并准确进入地球同步轨道。它与 2000 年 10 月 31 日发射的第一颗北斗导航试验卫星一起,构成了“北斗卫星导航定位系统”。2003 年 5 月 25 日 0 时 34 分,中国在西昌卫星发射中心用“长征三号甲”运载火箭成功地第三颗“北斗一号”导航定位卫星送入太空。这标志着中国已自主建立完善的卫星导航系统,对中国国民经济建设将起到积极作用。它与前两颗“北斗一号”工作卫星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信息。北斗卫星导航系统如图 1-3 所示。

2010 年 6 月 2 日,西昌卫星发射中心用“长征三号丙”运载火箭,将第四颗北斗导航卫

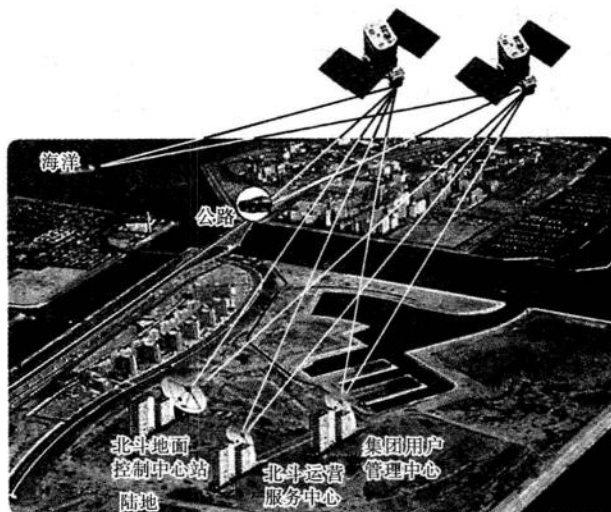


图 1-3 北斗卫星导航系统

星成功送入太空预定轨道。同年,8月1日,第五颗北斗卫星导航被送入太空预定轨道。这标志着北斗卫星导航定位系统组网建设又迈出重要一步。

北斗卫星导航定位系统将按照“三步走”的发展战略,于2020年左右建成覆盖全球的北斗卫星导航定位系统。第一步,从2000年到2003年,我国建成由3颗卫星组成的北斗卫星导航试验系统,成为世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家。第二步,建设北斗卫星导航系统,于2012年前形成我国及周边地区的覆盖能力。第三步,于2020年左右,北斗卫星导航定位系统将形成全球覆盖能力。

北斗卫星导航定位系统计划由5颗静止轨道卫星和30颗非静止轨道卫星组成,提供两种服务方式,即开放服务和授权服务。空间段、地面段和各类用户终端构成的大型航天系统,技术复杂、规模庞大,其建设应用将实现我国航天从单星研制向组批生产、从保单星成功向组网成功、从以卫星为核心向以系统为核心、从面向行业用户向面向大众用户的历史性转型,开启我国航天事业的新征程,并将为维护我国国家安全、推动经济社会科技文化全面发展提供重要保障。

北斗卫星导航是我国独立发展、自主运行的全球卫星导航定位系统,能够提供高精度、高可靠的导航、定位和授时服务。目前,这一系统已经进入发射组网阶段,系统建设稳步推进。该系统是全天候、全天时提供卫星导航信息的区域导航系统。这个系统建成后,主要为公路交通、铁路运输、海上作业等领域提供导航定位服务,对我国国民经济建设将起到积极的推动作用。

北斗卫星导航定位系统采用主动式定位原理,用户设备既接收来自两颗“北斗一号”卫星的导航定位信号,又要向卫星转发该信号,进而由地面中心站解算出各个用户的所在点位,并用通信的方式告之用户所测得的加密坐标值。

一、导航系统的频率

北斗卫星导航定位系统在国际电信联盟登记的频段为卫星无线电定位业务频段,上行为L频段(频率1 610~1 626.5 MHz),下行为S频段(频率2 483.5~2 500 MHz);登记的卫

星位置为赤道面东经 80°、东经 140°和东经 110.5°(最后一个为备份星位)。

二、北斗卫星导航定位系统两颗星的定位原理

北斗卫星导航定位系统由两颗地球静止卫星(GEO)对用户双向测距,由一个配有电子高程图库的地面中心站进行位置解算。定位由用户终端向中心站发出请求,中心站对其进行位置解算后将定位信息发送给该用户。它的定位基于三球交会原理,即以两颗卫星的已知坐标为圆心,各以测定的本星至用户机距离为半径,形成两个球面,用户机必然位于这两个球面交线的圆弧上。中心站电子高程地图库提供的是一个以地心为球心、以球心至地球表面高度为半径的非均匀球面。求解圆弧线与地球表面交点,并已知目标在赤道平面北侧,即可获得用户的二维位置。双星定位原理如图 1-4 所示。

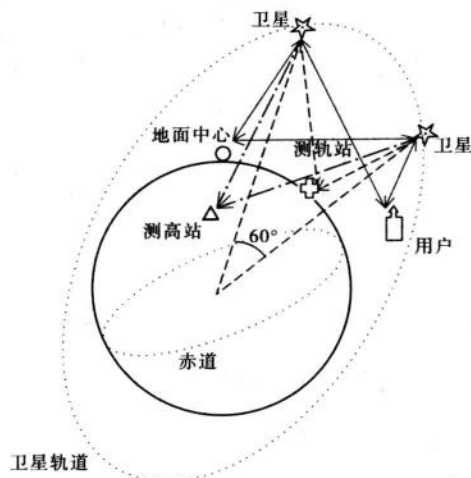


图 1-4 双星定位原理

系统的工作过程是:首先由中心控制系统向卫星 I 和卫星 II 同时发送询问信号,经卫星转发器向服务区内的用户广播。用户响应其中一颗卫星的询问信号,并同时向两颗卫星发送响应信号,经卫星转发回中心控制系统。中心控制系统接收并解调用户发来的信号,然后根据用户的申请服务内容进行相应的数据处理。对定位申请,中心控制系统测出两个时间延迟:一是从中心控制系统发出询问信号,经某一颗卫星转发到达用户,用户发出定位响应信号,经同一颗卫星转发回中心控制系统的延迟;二是从中心控制系统发出询问信号,经上述同一卫星到达用户,用户发出响应信号,经另一颗卫星转发回中心控制系统的延迟。由于中心控制系统和两颗卫星的位置均是已知的,因此由上面两个延迟量可以算出用户到第一颗卫星的距离,以及用户到两颗卫星的距离之和,从而知道用户处于一个以第一颗卫星为球心的球面,和以两颗卫星为焦点的椭球面之间的交线上。另外,中心控制系统从存储在计算机内的数字化地形图查寻到用户高程值,又可知用户处于某一与地球基准椭球面平行的椭球面上。从而中心控制系统可最终计算出用户所在点的三维坐标,这个坐标经加密后发送给用户。

三、北斗卫星导航定位系统的三大功能

(1)快速定位:北斗卫星导航定位系统可为服务区域内用户提供全天候、高精度、快速实时定位服务。

(2)简短通信:北斗卫星导航定位系统用户终端具有双向数字报文通信能力,可以一次传送超过 100 个汉字的信息。

(3)精密授时:北斗卫星导航定位系统具有单向和双向两种授时功能。根据不同的精度要求,利用授时终端,完成与北斗卫星导航定位系统之间的时间和频率同步,可提供数十纳秒级的时间同步精度。

四、北斗用户机的类型

依据北斗用户机的应用环境和功能的不同,可以将北斗用户机分为五类:

(1)基本型:适用于一般车辆、船舶及便携等用户的导航定位应用,可接收和发送定位及通信信息,与中心站及其他用户终端双向通信。

(2)通信型:适用于野外作业、水文测报、环境监测等各类数据采集和数据传输用户,可接收和发送短信息、报文,与中心站和其他用户终端进行双向或单向通信。

(3)授时型:适用于授时、校时、时间同步等用户,可提供数十纳秒级的时间同步精度。

(4)指挥型:适用于小型指挥中心指挥调度、监控管理等应用,具有鉴别、指挥下属其他北斗用户机的功能。可与下属北斗用户机及中心站进行通信,接收下属用户的报文,并向下属用户发播指令。

(5)多模型:既能接收北斗卫星定位和通信信息,又可利用 GPS 系统或 GPS 增强系统导航定位。适用于对位置信息要求比较高的用户。

五、北斗一号卫星导航定位系统与 GPS 系统比较

(1)覆盖范围:北斗卫星导航定位系统是覆盖我国本土的区域导航系统。覆盖范围是东经 $70^{\circ} \sim 145^{\circ}$,北纬 $5^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 之间的心脏地区,上大下小,最宽处在北纬 35° 左右。其定位精度为水平精度 $\pm 20\text{ m}$,高程 $\pm 10\text{ m}$ 。系统能容纳的用户数为 540 000 户/h。GPS 是覆盖全球的全天候导航系统,能够确保地球上任何地点、任何时间能同时观测到 6~9 颗卫星(实际上最多能观测到 11 颗)。

(2)卫星数量和轨道特性:北斗卫星导航定位系统是在地球赤道平面上设置两颗地球同步卫星,两颗卫星的赤道角距约 60° ,它们分别定点在东经 80° 和东经 140° 的上空。GPS 是在 6 个轨道平面上设置 24 颗卫星,轨道赤道倾角 55° ,轨道面赤道角距 60° 。GPS 卫星为准同步轨道,绕地球一周用时 11 h 58 min。

(3)定位原理:北斗卫星导航定位系统是主动式双向测距二维导航。地面中心控制系统解算后提供给用户三维的加密定位数据。“北斗一号”的这种工作原理带来两个方面的问题,一是用户定位的同时失去了无线电隐蔽性,这在军事上相当不利;另一方面由于用户设备必须包含发射机,因此在体积、质量、价格和功耗等方面处于不利的地位。GPS 是被动式伪码单向测距三维导航。由用户设备独立解算自己的三维定位数据,保密性强。

(4)定位精度:北斗卫星导航定位系统三维定位精度约几十米,授时精度约 100 ns。GPS 三维定位精度 P 码目前已由 16 m 提高到 6 m,C/A 码目前已由 25~100 m 提高到 12 m,授时精度约 20 ns。

(5)用户容量:北斗卫星导航定位系统由于是主动双向测距的询问—应答系统,用户设备与地球同步卫星之间不仅要接收地面中心控制系统的询问信号,还要求用户设备向同步卫星发射应答信号,这样,系统的用户容量取决于用户允许的信道阻塞率、询问信号速率和用户的响应频率。因此,北斗卫星导航定位系统的用户设备容量是有限的。GPS 是单向被动式测距系统,用户设备只要接收导航卫星发出的导航电文即可进行测距定位,因此 GPS 的用户设备容量是无限的。

(6)生存能力:和所有卫星导航定位系统一样,“北斗一号”基于中心控制系统和卫星的

工作,但是“北斗一号”对中心控制系统的依赖性明显要大很多,因为定位解算是由中心控制系统完成的。一旦中心控制系统受损,系统就不能继续工作了。为了弥补这种系统易损性,GPS 正在发展星际横向数据链技术,使万一主控站被毁后 GPS 卫星可以独立运行。

(7)实时性:“北斗一号”用户的定位申请要送回中心控制系统,中心控制系统解算出用户的三维位置数据之后再发回用户,时间延迟较长,因此对于高速运动体,就加大了定位的误差。此外,“北斗一号”卫星导航定位系统也有一些自身的特点,其具备的短信通信功能就是 GPS 所不具备的。

我国的双星卫星导航系统,综合了传统天文导航定位和地面无线电导航定位的优点,相当于一个设置在太空的无线电导航台。它不仅可以在任何时间、任何地点为用户确定其所在的地理经纬度和海拔,而且在定位性能上有所创新。这个系统将主要用于国家经济建设,为我国的船舶运输、公路交通、铁路运输、野外作业、水文测报、森林防火、渔业生产、勘察设计、环境监测等众多行业及其他有特殊调度指挥要求的单位提供定位、通信和授时等综合服务。例如,在西部和跨省区运营车辆,沿海和内河船舶的监控救援,水利、气象、石油、海洋和灾害预报的信息采集,通信、电力、铁路网络的精确授时,公安保卫、边防巡逻、海岸缉私和交通管理的导航通信等,其应用前景十分广阔。北斗卫星导航定位系统是国际上首次实现的区域导航定位系统,该系统的建立和投入使用,填补了我国导航卫星领域的空白,使我国成为世界上继美、俄之后自主建立卫星导航定位系统的国家。目前,世界上只有少数发达国家具备了自主建设卫星导航定位系统的能力。

综上所述,北斗卫星导航定位系统具有卫星数量少、投资小、用户设备简单价廉、能实现一定区域的导航定位、通信等多用途,可满足当前我国陆、海、空运输导航定位的需求。缺点是不能覆盖两极地区,赤道附近定位精度差,只能二维主动式定位,且需提供用户高程数据,不能满足高动态和保密的军事用户要求,用户数量受一定限制。但最重要的是,“北斗一号”导航定位系统是我国独立自主建立的卫星导航定位系统,它的研制成功标志着我国打破了美、俄在此领域的垄断地位,解决了中国自主卫星导航系统的有无问题。

当然,我们也需要认识到,随着我军高技术武器的不断发展,对导航定位的信息支持要求越来越高。北斗卫星导航定位系统仅是我国近期满足四化建设需要的自主简易导航系统,因此我们必须在发展“北斗一号”的基础上,借鉴国外 GPS、GLONASS 的成功经验,开发我国的第二代卫星导航系统。我们有理由相信,在不久的将来,具备先进性、适用性、军民两用、抗干扰性、抗摧毁性等特征的,适合我国国情的“北斗二号”将会展现在大家面前,更加完善的我国卫星导航定位系统也必将建立。

第三节 GPS 航天飞机测图系统

早在 1993 年,美国航空航天局的 Johnson 宇航中心便开始了 GPS 在航天飞机飞行中的实用研究,并于 1996 年 9 月 16 日的 STS-79 航天飞机飞行任务中,用 GPS 技术为其作导航、定时和实时轨道测量,并获得了成功。此后,美国航空航天局决定在“发现”号(Discovery)、“阿特兰蒂斯”号(Atlantis)和“奋进”号(Endeavour)3 种航天飞机上加装 GPS 信号接收天线,并且采用 Rockwell 生产的专用于航天飞机的 Collins MACR/S GPS 信号接收机,后者是一种 5 波道双频 P(Y)码接收机,具有随航天飞机进行飞行测量的优良性能。GPS 航