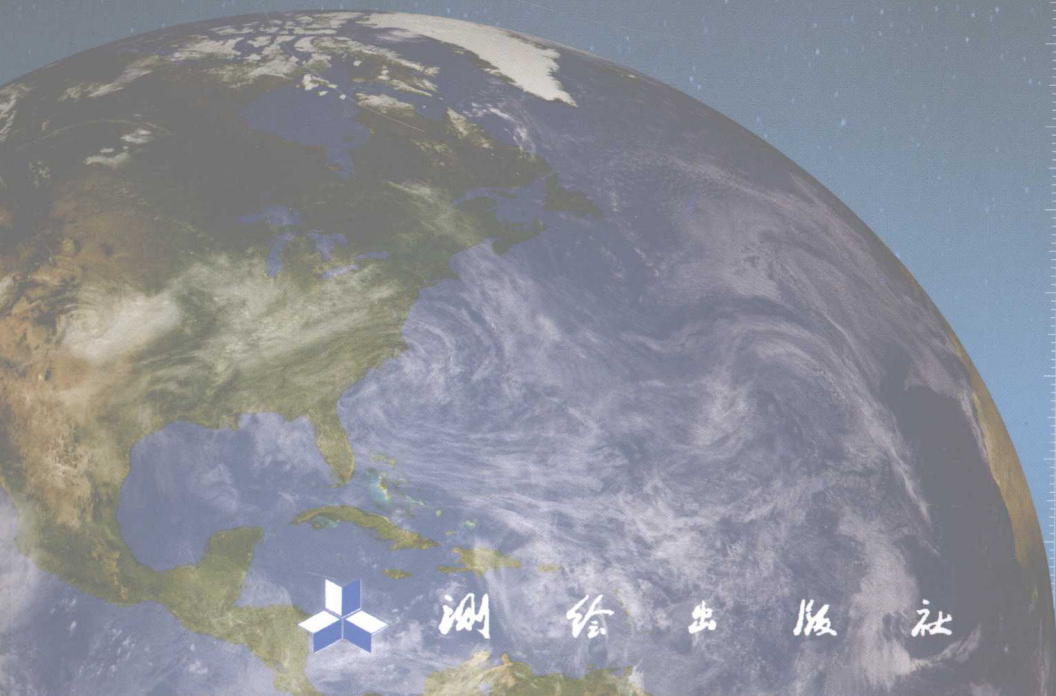


高等院校测绘类教学用书

Application of GPS in Surveying Engineering

# GPS 在测量工程中的应用

黄声享 郭英起 易庆林 编著 (第二版)



测绘出版社

◇高等院校测绘类教学用书

*Application of GPS in Surveying Engineering*

# GPS 在测量工程中的应用

(第二版)

黄声享 郭英起 易庆林 编著

测绘出版社

·北京·

© 黄声享,郭英起,易庆林 2012

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

## 内 容 提 要

本书系统阐述了 GPS 的基本理论、技术和方法,注重理论的实际应用,反映了 GPS 在测量工程领域应用的最新成果。全书共分九章,内容包括:卫星定位技术的现代发展及其在测量工程中的应用现状与展望;GPS 卫星定位基础及定位原理;GPS 在测量工程中应用的技术设计、组织实施、作业方法、数据处理、成果质量与误差分析以及 GPS 接收机;结合测量工程领域中 GPS 应用的大量实践,介绍了 GPS 定位技术的应用状况与潜在发展。

本书可作为高等院校测绘类或相关专业本专(科)生、函授生和培训班的教材,也可供测量工程技术人员和科技工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

GPS 在测量工程中的应用/黄声享,郭英起,易庆林  
编著.—2 版.—北京:测绘出版社,2012.8

ISBN 978-7-5030-2608-9

I. ①G… II. ①黄… ②郭… ③易… III. ①全球定  
位系统(GPS)—应用—工程测量—高等学校—教材  
IV. ①TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 116915 号

责任编辑 宣 东

封面设计 焦志恒

出版发行 测绘出版社

地 址 北京市西城区三里河路 50 号

邮政编码 100045

电子邮箱 smp@sinomaps.com

印 刷 湖北恒泰印务有限公司

成品规格 184mm×260mm

印 张 17.25

版 次 2007 年 8 月第 1 版

2012 年 8 月第 2 版

印 数 3001~5000 册

电 话 010-68531160(营销)

010-68531609(门市)

网 址 www.sinomaps.com

经 销 新华书店

字 数 440 千字

印 次 2012 年 8 月第 2 次印刷

定 价 40.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-2608-9/P·590

本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

## 第二版前言

《GPS 在测量工程中的应用》一书自 2007 年出版以来,经有关院校测绘工程本科专业几年的教学实践,证明该教学用书的内容体系较好,章节安排和教学内容符合教学规律,因此,第二版保留了原教材的结构体系。

近几年来,卫星导航定位技术发展迅猛,相应的国家和行业标准也作了修订完善,为了使该教学用书尽量反映现势性,我们对原教材作了必要的修改,主要修改内容有:

1)对第一章有关 GPS、GLONASS、Galileo 和北斗卫星导航系统(COMPASS)的发展现状进行了重新编写;

2)第二章补充了 PZ-90 坐标系和 2000 国家大地坐标系的内容;

3)第六章涉及《全球定位系统(GPS)测量规范》和《卫星定位城市测量技术规范》的内容,按照最新规范进行了修改;

4)第七章补充了双系统接收机的介绍;

5)对原书在教学过程中所反映的个别问题进行了全面修改。

在课程教学和生产实践中,一些师生和技术管理人员为本书的内容提出了宝贵的修改意见,谨此致谢。

限于我们的水平,书中不当之处恳请读者批评指正。

编者

2012 年 5 月于武汉

# 第一版前言

近 20 年来,以 GPS 为代表的空间定位技术得到了极大发展和推广应用,并逐步深入人们的日常生活之中。为满足人才培养、生产实践和科研工作的需要,我国自上世纪 80 年代末开始,以有关高校和科研机构为主,编著出版了多部与 GPS 有关的教材和参考书,也为本书写作提供了参考。

在测量工程领域,GPS 作为测量定位技术的一种重要手段,无论是在采用静态测量模式布设城市与工程控制网和变形监测网方面,还是在采用动态测量模式,尤其是采用 RTK 技术,用于数字测图、线路勘测、施工放样、水下地形测绘等方面,均得到了广泛应用,并取得了大量的工程建设测量成果。同时,利用 GPS 技术从事测量工作的人员众多,涉及面广。为适应卫星定位技术的发展需要,全面展现 GPS 在测量工程领域中应用的实践成果,便于初学者学习、理解和掌握,我们组织了有关高校富有经验的教师参加本书的编写。

编著本书的基本思想是,体现专业特点,注重内容的系统性、科学性、实用性和时效性。其直接服务对象是高等院校测绘类或相关专业本科生、专科生、函授生,以及培训班作为教材使用,同时,也可供测量工程技术人员和科技工作者参考。

全书共分九章:第一章概述卫星定位技术的现代发展及 GPS 在测量工程中应用现状与展望;第二至三章介绍 GPS 卫星定位基础与定位基本原理;第四章论述 GPS 定位的主要误差;第五章是 GPS 定位数据处理;第六章介绍 GPS 在测量工程中应用的技术设计、组织实施和作业方法;第七章是 GPS 接收机的分类、组成原理及维护管理;第八至九章重点结合典型工程实例,全面概括 GPS 测量控制网、GPS 变形监测和 GPS RTK 定位技术的普遍应用情况以及 GPS 在测量工程领域中的其他应用成果与潜在发展。

参加本书编写的老师有武汉大学的黄声享教授、黑龙江工程学院的郭英起副教授、三峡大学的易庆林教授级高级工程师。全书由黄声享负责统稿。

限于我们的水平,书中不当之处恳请读者批评指正。

编者  
2007 年 7 月

# 目 录

第一章 概述	1
§ 1.1 卫星定位技术的发展概况	1
1.1.1 卫星定位技术的发展历程	1
1.1.2 GPS 定位技术的特点	3
1.1.3 其他卫星定位系统简介	4
§ 1.2 GPS 系统的组成	9
1.2.1 空间部分	9
1.2.2 地面监控部分	10
1.2.3 用户部分	11
§ 1.3 GPS 在测量工程中的应用现状与展望	12
1.3.1 GPS 定位技术的应用前景	12
1.3.2 GPS 在我国工程建设中的应用现状	13
1.3.3 GPS 在测量工程中的应用展望	16
思考题	18
第二章 GPS 卫星定位基础	19
§ 2.1 时间系统和坐标系统	19
2.1.1 时间系统	19
2.1.2 坐标系统	22
§ 2.2 卫星轨道运动	29
2.2.1 近地卫星的轨道运动	30
2.2.2 GPS 卫星的运动	33
2.2.3 GPS 卫星星历	35
§ 2.3 GPS 卫星信号	37
2.3.1 GPS 的信号结构	37
2.3.2 GPS 卫星位置的计算	41
§ 2.4 美国政府的 GPS 政策及其现代化	43
2.4.1 SA 和 AS 政策及其对策	43
2.4.2 GPS 现代化	45
思考题	49
第三章 GPS 定位基本原理	50
§ 3.1 概述	50
§ 3.2 GPS 定位的观测量	51

3.2.1 码相位观测量(伪距观测量) .....	51
3.2.2 载波相位观测量 .....	53
§ 3.3 载波相位观测量的线性组合 .....	61
§ 3.4 GPS 定位方法 .....	65
3.4.1 绝对定位与相对定位 .....	65
3.4.2 差分 GPS 测量定位 .....	70
思考题 .....	76
<b>第四章 GPS 定位误差分析</b> .....	<b>77</b>
§ 4.1 概述 .....	77
4.1.1 GPS 定位中的误差分类 .....	77
4.1.2 消除或削弱误差影响的方法和措施 .....	77
§ 4.2 与卫星有关的误差 .....	78
4.2.1 卫星时钟误差 .....	78
4.2.2 卫星星历误差 .....	79
4.2.3 相对论效应误差 .....	81
§ 4.3 与信号传播有关的误差 .....	82
4.3.1 电离层折射误差 .....	82
4.3.2 对流层折射误差 .....	86
4.3.3 多路径效应误差 .....	88
§ 4.4 与接收机有关的误差 .....	89
4.4.1 接收机时钟误差 .....	89
4.4.2 接收机位置误差 .....	90
4.4.3 接收机天线相位中心位置误差 .....	90
§ 4.5 其他误差 .....	91
4.5.1 地球自转的影响 .....	91
4.5.2 地球潮汐的影响 .....	91
思考题 .....	92
<b>第五章 GPS 定位数据处理</b> .....	<b>93</b>
§ 5.1 数据预处理及质量分析 .....	94
5.1.1 数据预处理 .....	94
5.1.2 观测成果检核 .....	96
5.1.3 观测质量的评价标准 .....	97
5.1.4 关于重测问题 .....	98
§ 5.2 GPS 基线向量解算模型与精度评定 .....	99
5.2.1 双差观测值模型 .....	99
5.2.2 法方程式的组成及其解算 .....	100
5.2.3 精度评定 .....	102
§ 5.3 GPS 网平差与坐标转换 .....	104
5.3.1 GPS 网的三维无约束平差 .....	104

5.3.2	GPS 网的约束平差	107
5.3.3	GPS 基线向量网与地面网的联合平差	111
5.3.4	GPS 定位成果的坐标转换	112
§ 5.4	GPS 高程	120
5.4.1	高程系统简介	120
5.4.2	GPS 水准高程	122
5.4.3	GPS 重力高程	124
5.4.4	确定 GPS 高程的其他方法	125
	思考题	125
<b>第六章</b>	<b>GPS 测量的技术设计与实施</b>	<b>126</b>
§ 6.1	GPS 测量的技术设计	126
6.1.1	GPS 测量技术设计依据	126
6.1.2	GPS 测量的精度分级	127
6.1.3	坐标系统和起算数据的确定	129
6.1.4	GPS 测量的图形设计	130
§ 6.2	GPS 测量的组织实施	135
6.2.1	GPS 测量的外业准备	135
6.2.2	GPS 选点与标石埋设	137
6.2.3	GPS 测量的外业实施	138
6.2.4	技术总结与成果资料提交	142
§ 6.3	GPS 测量的作业模式	142
6.3.1	静态相对定位模式	143
6.3.2	快速静态相对定位模式	143
6.3.3	准动态相对定位模式	144
6.3.4	动态相对定位模式	144
6.3.5	GPS RTK 技术	144
6.3.6	网络 RTK 技术	146
	思考题	147
<b>第七章</b>	<b>GPS 接收机</b>	<b>148</b>
§ 7.1	GPS 接收机的分类	148
§ 7.2	GPS 接收机的组成和工作原理	151
§ 7.3	GPS 接收机的选用和检验	154
§ 7.4	GPS 接收机的使用维护	155
	思考题	157
<b>第八章</b>	<b>GPS 定位技术在测量工程中的普遍应用</b>	<b>158</b>
§ 8.1	GPS 测量控制网的建立	158
8.1.1	GPS 在城市控制测量中的应用	158
8.1.2	GPS 在桥梁施工控制测量中的应用	164
8.1.3	GPS 在隧道工程控制测量中的应用	169



8.1.4	GPS 在水电工程控制测量中的应用	172
8.1.5	GPS 在线路工程控制测量中的应用	173
§ 8.2	GPS RTK 定位技术在测量工程中的应用	177
8.2.1	GPS RTK 技术在数字测图中的应用	178
8.2.2	GPS RTK 技术在工程施工定位放样中的应用	183
8.2.3	GPS RTK 技术在水下地形测绘中的应用	186
§ 8.3	GPS 在变形监测中的应用	192
8.3.1	GPS 在变形监测中的应用特点	192
8.3.2	GPS 在桥梁健康监测中的应用	195
8.3.3	GPS 在大坝安全监测中的应用	200
8.3.4	GPS 在滑坡监测中的应用	211
8.3.5	GPS 在高层建筑监测中的应用	218
8.3.6	GPS 在矿区变形监测中的应用	222
8.3.7	GPS 在城市地表变形监测中的应用	223
	思考题	226
<b>第九章</b>	<b>GPS 定位技术在测量工程中的其他应用与发展</b>	<b>227</b>
§ 9.1	高层建筑施工中测量基准的传递	227
§ 9.2	GPS 跨河水准测量	232
§ 9.3	GPS 水上打桩定位系统	235
§ 9.4	GPS 网络 RTK 技术及其应用	244
§ 9.5	GPS 实时定位监控系统及其在施工管理中的应用	249
§ 9.6	GPS 一机多天线技术及其应用	255
§ 9.7	伪卫星定位技术及其应用	258
	思考题	263
	参考文献	264

# Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b>	1
1.1 General developmental situations of satellites positioning techniques	1
1.2 Composing of GPS	9
1.3 The application actuality and prospect in surveying engineering with GPS	12
Comprehension exercises	18
<b>Chapter 2 Basic knowledge of GPS positioning</b>	19
2.1 Time systems and coordinate systems	19
2.2 Satellite orbital motion	29
2.3 Satellite signal of GPS	37
2.4 American government's GPS policy and its modernization	43
Comprehension exercises	49
<b>Chapter 3 Basic principle of GPS positioning</b>	50
3.1 Introduction	50
3.2 Observations of GPS positioning	51
3.3 Linear combinations of carrier phases	61
3.4 Methods of GPS positioning	65
Comprehension exercises	76
<b>Chapter 4 Error analysis of GPS positioning</b>	77
4.1 Introduction	77
4.2 Errors about satellites	78
4.3 Errors about signal transmitting	82
4.4 Errors about receiver	89
4.5 Other errors	91
Comprehension exercises	92
<b>Chapter 5 Data processing of GPS positioning</b>	93
5.1 Data preprocessing and quality analysis	94
5.2 GPS baseline solution model and precision evaluation	99
5.3 GPS network adjustment and coordinate transformation	104
5.4 GPS elevation	120
Comprehension exercises	125
<b>Chapter 6 Technical design and implementation of GPS positioning</b>	126
6.1 Technical design of GPS measurement	126
6.2 Organization and implementation of GPS measurement	135
6.3 Working mode of GPS measurement	142

---

---

Comprehension exercises .....	147
<b>Chapter 7 GPS receiver .....</b>	<b>148</b>
7.1 Category of GPS receiver .....	148
7.2 Composing and work principle of GPS receiver .....	151
7.3 Option and proof-test of GPS receiver .....	154
7.4 Use and maintenance of GPS receiver .....	155
Comprehension exercises .....	157
<b>Chapter 8 Prevalent applications of GPS in surveying engineering .....</b>	<b>158</b>
8.1 Establishing survey control networks with GPS .....	158
8.2 Applications of GPS RTK technology in surveying engineering .....	177
8.3 Applications of GPS in deformation monitoring .....	192
Comprehension exercises .....	226
<b>Chapter 9 Other applications and future of GPS in surveying engineering .....</b>	<b>227</b>
9.1 Application of GPS in the construction survey datum transfer for high-rise buildings .....	227
9.2 River-crossing leveling with GPS .....	232
9.3 Water-borne piling positioning system with GPS .....	235
9.4 Techniques and applications of GPS network RTK .....	244
9.5 GPS real-time positioning supervisory system and its applications in construction management .....	249
9.6 Techniques and applications of one receiver with multi-antenna GPS system .....	255
9.7 Techniques and applications of pseudolites positioning .....	258
Comprehension exercises .....	263
<b>Reference .....</b>	<b>264</b>

## ◇ 第一章

## 概 述

## § 1.1 卫星定位技术的发展概况

## 1.1.1 卫星定位技术的发展历程

自 1957 年 10 月 4 日,世界上第一颗人造地球卫星发射成功以来,人类在空间科学领域取得了一个又一个重大突破。人造地球卫星技术在军事、通信、气象、资源勘察、导航、遥感、大地测量、地球动力学以及天文等众多领域得到了极其广泛的运用。20 世纪 80 年代中后期,人们开始利用全球定位系统(GPS)进行测量定位试验,并逐渐发展到今天,GPS 已成为测量工程领域中的一种极为重要的测量定位手段。目前,在工程建设的勘测、施工、运营管理各个阶段,都可以见到 GPS 定位技术的应用。随着 GPS 技术基础理论及其设备的进一步完善和发展,GPS 定位技术在测量工程领域的应用将更为广泛和深入。

## 1. 早期的卫星定位技术

所谓卫星定位技术是利用人造地球卫星来精确测定地面点的位置及其随时间的变化状况的一整套方法、理论和技术。起初,是把人造地球卫星作为一种空间的动态观测目标,由地面卫星摄影仪对卫星进行摄影观测,确定测站至卫星的方向,建立卫星大地网;或用激光测卫技术对卫星进行测距,确定地面测站至卫星的距离,建立卫星测距网。这种把卫星作为空间动态观测目标的卫星三角测量方法,在很大程度上解决了常规定位测量技术难以实现的远距离目标联测问题,该技术在 20 世纪六七十年代曾一度成为卫星大地测量的主要技术之一。但是,由于该观测方法受卫星可见条件及天气的影响,不仅费时费力,定位精度低,而且不能测得点位的地心坐标。比如,1967~1971 年间,美国国家大地测量局(NGS)在英国和前联邦德国测绘部门的协助下,采用卫星摄影观测方法布设过著名的全球卫星大地网——BC-4 网,该网由 45 个站组成,点位精度为 $\pm 4.1\text{m}$ 。

由于卫星三角测量方法存在的局限性,测绘科技界随后很快致力于把卫

星作为空间动态已知点来研究,开创了卫星多普勒定位。1964 年美国建成了第一代卫星导航定位系统,也称海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System, NNSS),该系统是采用多普勒测量来进行定轨和定位的。NNSS 系统又称子午卫星导航系统,系统的卫星星座一般由 6 颗工作卫星组成,其平均轨道高度约为 1 070km,运行周期约为 107min,卫星轨道近似圆形且经过地球南、北极上空,故称子午卫星(Transit)。使用时,从测点上接收子午卫星系统发出的无线电信号,在地球表面进行单点定位或联测定位,以此获得测站点的三维地心坐标。1967 年 7 月该系统部分导航电文解密供民用,20 世纪 70 年代中期,我国开始引进多普勒接收机,进行了西沙、南沙群岛的大地测量基准联测,于 1980 年布设了由 37 个点组成的全国卫星多普勒大地网。此外,石油和地质勘探部门在我国西北等地布设了数千个多普勒点,为国民经济建设发挥了重要作用。

但是,由于多普勒卫星定位的自身局限性,致使一次定位所需时间过长,作业效率偏低,平均每间隔 1.5h 才能观测到一颗卫星;由于不是一个连续的导航定位系统,故不能实现实时导航定位;定位精度也偏低,一般只能获得分米级至米级的定位精度。正因为多普勒导航定位应用受到的局限较大,所以当该系统投入工作后不久,美国国防部就着手研制第二代卫星导航定位系统——全球定位系统(GPS)。

## 2. 全球定位系统(GPS)

实质上,美国在 1967 年将 NNSS 子午卫星导航系统的导航电文解密公开时,就已开始 GPS 的建立计划。1973 年 12 月,美国国防部正式批准其陆海空三军联合研制一种新的卫星导航系统——NAVSTAR/GPS,其英文全称是“Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System”,意为“授时与测距导航系统/全球定位系统”,简称 GPS。GPS 是以卫星为基础的无线电导航定位系统,具有全能性(陆地、海洋、航空和航天)、全球性、全天候、连续性和实时性的导航、定位、定时功能,能提供精密的三维坐标、速度和时间参数。

“GPS 计划”可分为四期工程:

第一期工程(1967 ~ 1973 年)为预研阶段,发射了 T I 和 T II 两颗卫星;

第二期工程(1974 ~ 1978 年)为制订方案和方案论证,包括制订规划、总体设计、理论研究、发射实验卫星、研制用户接收机等;

第三期工程(1979 ~ 1987 年)为系统论证,包括系统试验、操作控制系统的研制和运转、工作卫星的研制等;

第四期工程(1988 ~ 1993 年)为生产实验,包括生产作业和发展应用。

整个系统包括卫星星座、地面控制和监测站、用户设备三大部分。GPS 系统在论证阶段共发射了 11 颗 BLOCK I 型试验卫星,生产试验阶段发射了多颗 BLOCK II 型、BLOCK II A 型和第三代 BLOCK IIR 型卫星,GPS 卫星系统由此而建成。

图 1-1 为由 24 颗卫星构成的 GPS 卫星星座,其基本参数包括:卫星颗数 21+3;6 个卫星轨道面;卫星高度 20 200km;卫星轨道倾角  $55^\circ$ ;卫星绕地球一周的运行周期为 11h58min(恒星时为 12h);载波频率为  $L_1 = 1\,575.42\text{MHz}$ (波长约 19cm)和  $L_2 = 1\,227.60\text{MHz}$ (波长约 24cm)。当截止高度角取  $15^\circ$  时,GPS 卫星星座能保证地球表面上的任一地点的用户在任一时刻同时观测到 4 ~ 8 颗 GPS 卫星。当截止高度角取  $10^\circ$  时,最多能同时观测到 10 颗 GPS 卫星。当截止高度角取  $5^\circ$  时,最多能同时观测到 12 颗 GPS 卫星。2000 年底,GPS 卫星星座是由 23 颗 BLOCK II 和 BLOCK II A 卫星以及 5 颗 BLOCK IIR 卫星组成的,在一般情况下,用户能同时观

测到 7~8 颗 GPS 卫星。

图 1-2 为 GPS 工作卫星的外形。其在轨重量是 843.68kg,设计寿命为七年半。当卫星进入预定轨道后,依靠太阳能电池和镉镍蓄电池供电,维持正常工作。每颗卫星有一个推力系统,以便使卫星轨道保持在适当的位置。GPS 卫星通过 12 根螺旋形天线组成的阵列天线发射的电磁波束(其张角大约为  $30^\circ$ )覆盖卫星的可见地面。卫星姿态调整采用三轴稳定方式,由 4 个斜装惯性轮和喷气控制装置构成三轴稳定系统,致使螺旋天线阵列所辐射的波束对准卫星可见地面。

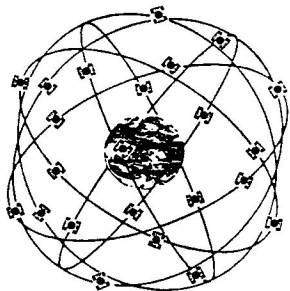


图 1-1 GPS 卫星星座

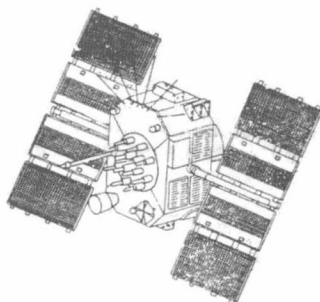


图 1-2 GPS 工作卫星的外形

### 3. GPS 现代化

为了保持 GPS 系统在卫星导航定位系统以及 GPS 产业中的领先地位,1999 年 1 月美国提出了 GPS 现代化的计划。GPS 现代化计划的内涵是:①更好地保护美方利益和使用,发展军码和强化军码的保密性能,加强抗干扰能力;②阻扰敌对方的使用,施加干扰,施加 SA 和 AS 等;③保持在有威胁地区以外的民用用户更精确、更安全地使用。

GPS 现代化计划的进程如下:

1) 第一阶段发射 12 颗改进型的 GPS BLOCK IIR 型卫星,它们具有一些新的功能。在  $L_2$  上加载 C/A 码;在  $L_1$  和  $L_2$  上播发 P(Y)码的同时,在这两个频率上还试验性地同时加载新的军码(M 码);GPS BLOCK IIR 型的信号发射功率,不论在民用通道还是军用通道上都有很大提高。

2) 第二阶段发射 6 颗 GPS BLOCK IIF 型卫星。GPS BLOCK IIF 型卫星除了有 GPS BLOCK IIR 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  $L_5$  频率。原计划第一颗 GPS IIF 型卫星的发射不迟于 2005 年,到 2008 年在轨运行的 GPS 卫星中至少有 18 颗 BLOCK IIF 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 IIF 卫星运行,共计 24+3 颗。但后来由于技术原因,发射 GPS 现代化 IIF 卫星系列的时间有所延误。

3) 第三阶段发射 GPS BLOCK III 型卫星。早在 2004 年,美国国防部开始研究 GPS III 的采购和结构概念,以便验证系统要求。GPS III 将选择全新的优化设计方案,放弃现有的 24 颗中轨道卫星,采用全新的 33 颗高轨道加静止轨道卫星组成。GPS III 全部卫星在轨运行将在 2015~2020 年实现。

至 2012 年 5 月 6 日,在轨的 31 颗 GPS 卫星中,IIA 型卫星有 10 颗,II R 型卫星有 12 颗,II R-M 型卫星有 7 颗,II F 型卫星仅有 2 颗。

#### 1.1.2 GPS 定位技术的特点

GPS 系统自建成后,之所以能快速发展,得益于该系统所具有的高精度、全天候、高效率、

多功能、操作简便、应用广泛等特点。

(1) 观测站之间无需通视

GPS 测量不要求观测站之间相互通视,只需保持观测站上空开阔即可,因此可大量节省造标费用(造标费约占测量总费用的 30% ~ 50%)。由于无需点位间通视,点位位置可根据需要灵活布设,这样就省去经典测量控制网中的传递点、过渡点的测量工作。

(2) 定位精度高

GPS 定位技术的工程应用表明,其相对定位精度在 50km 以内时可达  $10^{-6}$ ,在 100 ~ 500km 时精度可达  $10^{-7}$ ,1 000km 以上时精度可达  $10^{-9}$ 。在 300 ~ 1 500m 工程精密定位测量中,1h 以上观测的解其平均平面误差小于 1mm。目前,GPS 在测量工程领域的各种应用足以满足工程实际对定位测量的精度要求。

(3) 观测时间短

随着 GPS 系统的不断完善,软件与硬件的不断更新,目前,在 20km 以内的相对静态定位,观测时间仅需 15 ~ 20min;快速静态相对定位测量时,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;动态相对定位测量时,流动站出发时观测时间只需 1 ~ 2min,然后随即定位,每站观测时间仅需几秒钟。

(4) 提供三维坐标

传统测量控制是将平面和高程采用不同的方法分别施测,而 GPS 测量在精确测定观测站平面位置时,还可以精确测定观测站的大地高程。

(5) 操作简便

GPS 测量的自动化程度非常高,有的已达到“傻瓜化”的程度。操作员只需安装并开关仪器、量取仪器高度和监视仪器工作状态,其他工作则由 GPS 接收机自动完成。现在,接收机的体积越来越小,重量亦越来越轻,更便于携带和搬运。

(6) 全天候作业

GPS 定位观测可以在 1 天 24 小时内的任何时间、任何地点连续进行,且不受天气状况的影响。

(7) 功能多,应用广

GPS 系统不仅可用于定位、导航,还可用于测速、测时。测速的精度可达 0.1m/s,测时的精度可达几十毫微秒。并且,其应用领域正在不断扩大。

### 1.1.3 其他卫星定位系统简介

#### 1. GLONASS 全球导航卫星系统

GLONASS(Global Navigation Satellite System,中文简称“格洛纳斯”)全球导航卫星系统的起步比 GPS 要晚 9 年,是苏联(后由俄罗斯接管)于 20 世纪 80 年代开始建立的,为全球用户提供位置和时间信息的免费服务。1982 年 10 月 12 日发射了第一颗 GLONASS 卫星,历经 13 年的努力,于 1995 年完成了整个系统 24 颗中高度椭圆轨道卫星加 1 颗备用卫星的组网,共耗资 30 多亿美元。

GLONASS 系统与 GPS 系统非常相似,它由空间卫星星座、地面控制和用户设备 3 部分组成。系统的基本参数为:卫星颗数 21+3;有 3 条等间隔椭圆轨道,轨道面间的夹角为  $120^\circ$ ;轨道倾角  $64.8^\circ$ ;轨道偏心率为 0.01;每个轨道上等间隔地分布 8 颗卫星;卫星高度 19 100km;卫星绕地球运行一周的周期约为 11h15min;卫星的载波频率  $L_1$  为 1 602 ~ 1 616MHz,  $L_2$  为 1 246 ~ 1 256MHz。

由于 GLONASS 卫星的轨道倾角大于 GPS 卫星的轨道倾角,所以它更适合于高纬度地区的导航定位。图 1-3 为 GLONASS 卫星星座,图 1-4 为 GLONASS 工作卫星的外形。

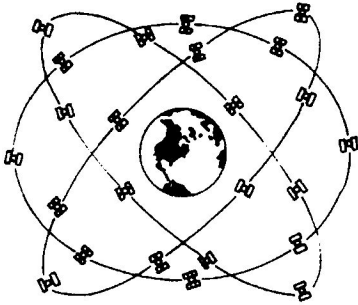


图 1-3 GLONASS 卫星星座

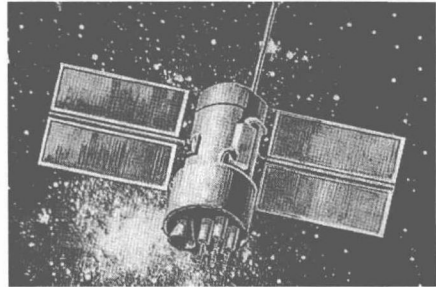


图 1-4 GLONASS 工作卫星的外形

虽然 GLONASS 全球导航卫星系统在 1995 年就完成了星座部署,达到了完全运作的能力,工作卫星数达到 25 颗,但是由于俄罗斯经济状况的限制,其后发射的卫星太少,加上卫星寿命较短(约 3 年),至 2001 年初仅有 6 颗卫星正常工作。随着经济好转及卫星导航定位业务的迅猛发展,俄罗斯开始着手 GLONASS 的系统重建(维护、更新)及研究工作。2001 年 8 月,被搁置 6 年之后的 GLONASS 终于有了新的转机,获得了俄罗斯政府的财政支持承诺,俄政府计划将 GLONASS 最新型卫星的平均寿命延长到 7 年。

GLONASS-M 卫星是俄罗斯于 20 世纪 90 年代开始研制的第二代导航卫星,第一颗卫星于 2003 年 10 月发射,2004 年底进入运行。较之第一代卫星,GLONASS-M 卫星新的星载铯原子钟频率稳定度更高,并能提供更精准的卫星时钟改正量, $L_2$  载波上增加民用信号(类似于 GPS),增加了星间的无线电链路,具有更稳定的卫星运行轨迹,改进了卫星的运动动态模型,太阳能电池板的定位精度达  $2^\circ$ 。

为进一步推动 GLONASS 导航系统的优化,第三代 GLONASS-K 卫星做了进一步的改进,寿命可达 10~12 年,可采用码分多址(CDMA)的方式发射信号,增加第三个民用信号,重量更轻便,降低了发射成本。

此外,俄罗斯计划于 2015 年开始发射新一代的 GLONASS-KM 卫星,以增强系统的整体功能,扩大 GLONASS 的应用领域,提高 GLONASS 与 GPS 的竞争能力。新一代的 GLONASS-KM 卫星从 2002 年起已经开始进行需求论证和预研工作。

截至 2012 年 5 月 6 日,GLONASS 在轨卫星总数有 31 颗,其中 24 颗处于正常工作状态,2 颗暂时取消维护,4 颗处于轨道储备,1 颗在轨试验。

## 2. Galileo(伽利略)系统

卫星导航定位技术的成功和发展得到国际社会公认,21 世纪无线电导航定位技术将以卫星导航系统为主。但作为全球统一的卫星导航系统不可能完全依靠在某国军用系统上,它必须是使用放心、安全可靠的国际运行管理的纯民用系统。由于目前运行的 GPS 和 GLONASS 都是军用系统,且 GPS 占主要地位,为了打破美国一统天下的局面,欧盟于 1999 年首次公布决定启动 Galileo(伽利略)卫星导航系统计划,建立自主的民用全球卫星定位系统。

Galileo 系统是一个多国、民建、民控、民用系统,该系统建成后将为全球民间用户在许多



新领域应用卫星导航技术提供更好的服务,同时也为欧盟各国发展卫星导航技术产业提供机遇。

Galileo 系统原计划于 2008 年完成,但是由于各成员国存在分歧,计划已几经推迟。根据 2010 年 1 月欧盟委员会的一份报告,重新调整了的伽利略计划从启动到实现运营的 4 个发展阶段为:

①2002 ~ 2005 年为定义阶段,论证计划的必要性、可行性及具体实施措施;

②2005 ~ 2011 年为在轨验证阶段,其任务是成功研制、实施和验证 Galileo 空间段及地面段设施,进行系统在轨验证;

③2011 ~ 2014 年为全面部署阶段,包括制造和发射正式运行的卫星,建成整个地面基础设施;

④2014 年之后为开发利用阶段,提供运营服务,按计划更新卫星并进行系统维护等。

需要说明的是,根据欧盟委员会最新公布的报告,Galileo 系统上述计划于 2014 年投入使用的说法已被推翻,该计划在 2017 ~ 2018 年之前将难以投入运行。

Galileo 系统的卫星星座由分布在 3 个轨道面上的 30 颗中等高度轨道卫星(MEO)构成,每个轨道面 10 颗卫星,其中 1 颗作为备用(如图 1-5 所示)。卫星轨道倾角为  $56^\circ$ ,计划卫星距地面高度为 23 616km,卫星运行周期 14h4min。这样,地球南北纬  $75^\circ$  以上地区都可以覆盖,图 1-6 为 Galileo 卫星示意图。



图 1-5 Galileo 卫星星座示意图

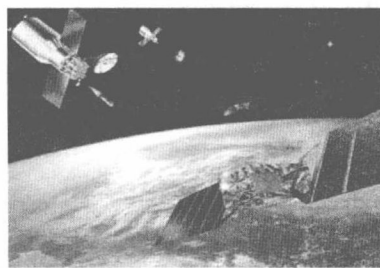


图 1-6 Galileo 卫星示意图

2005 年 12 月 28 日,首颗实验卫星“GIOVE-A”由俄罗斯“联盟-FG”火箭从哈萨克斯坦(Kazakhstan)的拜科努尔航天中心(Baikonur Cosmodrome)发射(如图 1-7 所示),成功进入距离地面 23 000km 的预定轨道,开始测试工作。这颗实验卫星重 600kg,由英国萨里卫星技术公司制造,是 Galileo 系统首批 2 颗实验卫星中的第一颗。第二颗实验卫星“GIOVE-B”是于 2008 年 4 月 26 日发射升空入轨的。这两颗实验卫星主要用于测试由国际电联给予 Galileo 系统的通信频率,并在轨道上进行对 Galileo 系统专用导航信号等技术的测试,在太空试验 Galileo 计划至关重要,以避免无线电波对美国 and 俄罗斯的全球定位系统产生干扰。GIOVE-A 和 GIOVE-B 虽然属于实验卫星,不在 Galileo 计划的 30 颗正式卫星之列,但它们的发射标志着 Galileo 计划已进入实施阶段。

目前,Galileo 计划正处于在轨验证阶段的关键时期。继发射 2 颗 GIOVE 实验卫星之