

大地形变测量进展

孙铁珊 张祖胜 张中伏 潘丽华 编译

中国铁道出版社

大地形变测量进展

孙铁珊 张祖胜
张中伏 潘丽华 编译

中国铁道出版社

1993年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

在对 80 年代国内外大地形变测量文献的研究的基础上,作者编写了本书,本书集中反映了该学科 80 年代的国内外的研究成果,为今后我国大地形变测量的研究与发展提供了有价值的依据。

全书共收入了综述报告一篇、本学科各分支有代表性的译文 17 篇及文摘 500 余篇,内容丰富、新颖,可供从事地壳形变测量、大地测量及其相关学科的研究人员、实际作业人员及高校师生参考。

大地形变测量进展

孙铁珊 张祖胜 编译
张中伏 潘丽华

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条 14 号)

责任编辑 于文著 封面设计 翟 达

中国铁道出版社印刷厂印

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:17.75 插页:1 字数:462 千

1993 年 6 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:1—1200 册

ISBN7-113-01379-1/TU·298 定价:14.35 元

前 言

20 世纪 80 年代,大地形变测量这一边缘学科得到引人注目的发展。这促使我们产生一个愿望,即用某种形式较全面地反映这一时期该学科的发展概貌。最后我们确定以综合评述、专题论文和文摘节录三种形式,以不同的广度和深度综合反映这一概貌。当然,这只是一种良好的愿望和初次尝试,真正做起来是力不从心的。

综合评述部分由张祖胜研究员撰写;专题论文由孙铁珊和张祖胜选编,组织国家地震局第一地形变监测中心和地震研究所的同志译校;文摘部分由张中伏、潘丽华和孙铁珊同志选编、译校。

本文集是“大地形变测量进展的综合研究”课题的成果。这一研究课题得到地震科学基金会的资助和国家地震局科技监测司的支持。

在这一尝试中,关于我国大地形变测量研究的进展,集中反映在综合评述中,其他两部分反映较少,今后应加强这方面的调研工作。作为二次文献的文摘部分,分类编排是否得当,文章归类是否准确,希望能引起讨论,以期推进这一学科的文献工作。

由于我们水平有限,在选材和编译方面会有不少疏漏之处,望广大专业工作者和广大读者指正。

编 者

1992 年 1 月

目 录

一、综 述

(一)大地形变测量的内容、方法和意义	1
(二)空间定位技术的发展	3
(三)常规大地测量技术的改进	12
(四)重要观测成果	15
(五)理论研究的进展	22
(六)新观点、新理论、新方法的探讨	28
(七)我国大地形变测量前景展望	32

二、专题译文

地球科学中大地形变测量与大地构造形变测量 的结合	36
1. 引言(36) 2. 广义方法的基本原理(37) 3. 广义方法在沉 降研究中的应用(40) 4. 结论(46) 附录 I (47) 附录 II (48)	
运动大地测量学方法	51
1. 引言(51) 2. 大地测量学的运动学模型(52) 3. 误差分析 (55) 4. 误差估计(59) 5. 结论(65)	
论相对论性的大地测量	66
1. 相对论大地测量的基本方法(67) 2. 理论考虑(68) 3. 相 对论性真时差的时间收集器(73) 4. 相对论性大地水准面 (75) 5. 技术考虑(76) 附录(78)	
定位是否充分满足探测形变的要求	79
1. 现有水准网的质量(80) 2. 现有水平网的质量(85) 3. 现 代定位网的质量(90) 4. 对未来的定位的展望(93)	
大地形变测量的几何模型	94

1. 水平几何模型(94)	2. 垂直几何模型(100)	3. 模型的设计(107)	4. 垂直基准变化的模型(114)
由太平洋 VLBI 网测定的北美板块和太平洋板块 1984~1985 年间的相对运动..... 120			
1. 引言(121) 2. VLBI 实验(121)			
美国西部地区空间大地测量新构造和板块运动的形变矢量约束..... 133			
1. 引言(134) 2. 积分形变速率的贝叶斯(Bayes)估计(137)			
3. 结果(138) 4. 讨论(144) 5. 结论(146)			
用全球定位系统干涉测量法建立三维大地控制..... 148			
1. 引言(149) 2. 资料分析,理论(151) 3. Eifel 联测(157)			
4. 观测分析(161) 5. 讨论(168) 6. 结论(175)			
用 GPS 技术加强高程网 176			
1. 序言(177) 2. 主分量分析(178) 3. 模拟水准网(179)			
4. 用 GPS 测定高程(181) 5. 水准测量与 GPS 测量的联合(185) 6. 结论(188)			
加州帕克菲尔德附近圣·安德列斯断层的地震形变周期..... 194			
1. 引言(194) 2. 资料(196) 3. 方法(201) 4. 震时的走滑分布(205) 5. 地震周期(210) 6. 其他的先验假设(215)			
7. 讨论(221)			
加州霍利斯特地区的无震地壳形变位错模型..... 224			
1. 引言(225) 2. 无震形变的位错模型(226) 3. 非线性反演过程(232) 4. 霍利斯特附近地区应变积累分析(236) 5. 结果(245) 6. 讨论(253)			
喀尔巴阡-巴尔干地区的地壳地震构造形变 258			
根据大地测量证据得到的帕米尔和天山之间转换带的地球动力学..... 266			
根据原民主德国复测水准推求的近期地壳垂直运动..... 274			

1. 原民主德国境内大地垂直控制网的发展(274)	2. 测量技术和 1974~1982 年间水准测量所达到的精度的估计(276)
3. 确定近期地壳垂直运动的方法(278)	4. 原民主德国近期地壳垂直运动图的地质解释(282)
5. 结果的评价(284)	分组参数的大地测量网非线性平差法..... 285
1. 引言(285)	2. 问题的概述(286)
3. 大地网模型的非线性平差(286)	4. Seidel 方法的拓扑问题(293)
5. Seidel 方法的技术问题(296)	6. 结论(304)
未知参数估计和检验的进展..... 304	
1. 一般情况(304)	2. 工作计划(305)
3. 方差协方差分量估计的某些想法(306)	4. 高级模型的情况(307)
5. 解法上的进展(310)	6. 结论(312)
优化设计问题..... 313	
1. 引言(313)	2. 二级设计(313)
3. 准则矩阵(317)	4. 总报告(320)
三、文摘节录 322	
(一)总论..... 322	
1. 理论与方法(322)	2. 现状与计划(342)
(二)形变测量的空间技术..... 357	
(三)形变测量的常规技术..... 388	
(四)形变测量成果的数据处理..... 396	
(五)形变测量成果的物理解释..... 419	
(六)形变现象的模拟与反演..... 448	
(七)强震近场形变及断层活动..... 465	
(八)强震的地壳形变前兆特征..... 489	
(九)世界各地的地壳形变..... 511	
1. 亚洲地区(511)	2. 原苏联地区(527)
3. 欧洲地区(534)	4. 北美地区(545)
5. 其他地区(557)	

一、综 述

张祖胜

(一)大地形变测量的内容、 方法和意义

大地形变测量到目前为止尚未有一个确切的统一的名称,有些学者将其称之为地壳形变测量,另一些称之为动态大地测量,更有称之为动力大地测量的。但不论如何称谓,其基本内容是应用大地测量方法,测定地壳的运动和变形。

地球在内力和外力的作用下,处于不断运动的状态,其外形也在不断的变化。地球的运动可以分为整体运动和局部变形两种。前者包括地极的移动、地球自转速度的变化以及固体潮汐;后者包括全球性的板块运动、板间带的变形、板内区域地壳变形、活断层的运动以及非构造因素引起的地表变形。目前广义的大地形变测量包含测定上述整体运动和局部变形两部分,而狭义的只包含局部形变。

应用大地测量方法研究地壳的运动和变形,其时间覆盖尺度大约为 10^{-1} 天 $\sim 10^2$ 年。为监测预报地震进行的活断层运动的监测,其取样频率可达每天数次,而大区域的地壳变动的复测周期,可达几十年甚至上百年。大地形变测量的空间覆盖尺度也很宽,从几米至几百、几千公里,也即 $10^0\text{m} \sim 10^4\text{km}$ 。它可以反映局部小褶皱、小断裂的活动,也可以量测全球性的板块运动,其精度为几米时的微米级到几千公里时的厘米级,也即在 $10^{-5} \sim 10^{-9}$ 之间,是一种大量程高精度的测量。因此,这要求应用当今大地测量中的最精密的仪器、最完善的观测方法以及最严密的数学处理技术。

空间大地测量方法为大范围的地壳形变测量提供了最快捷、最精密、最经济的观测手段。VLBI、SLR、尤其是 GPS 技术的应用为

大量程(几千公里)、高精度($10^{-7} \sim 10^{-9}$)地测量地面点位及其变化提供了可能。几十年前难以想像的全球跨越陆地和海洋的板块运动监测已成为现实;几天内完成用常规大地测量方法需几年才能完成的大范围区域测量也已屡见不鲜了;进一步应用空间技术,进行大范围地壳运动的实时监测,可以说已为期不远了。

事物发展是不平衡的,尽管空间技术已有长足的进步,但目前常规大地测量在大多数国家和地区,仍然是人类进行地壳运动监测的主要手段。这一方面是由于常规测量技术,例如物理测距方法的不断改进和完善。另一方面,在一些技术领域内,空间技术尚无法替代现有的常规技术。例如在垂直形变测量方面,精密水准测量仍然是最精确和最方便的一种方法;又如在活断层的监测上,小跨距、高精度和高频次的观测,也是空间技术力不能及的。

当前,作为全球性以及大范围内的水平形变监测,包括板块运动、板间带变形、大区域的板内形变等的观测,几乎已全部由空间技术所包揽。局部小区域的水平形变监测,已由过去的三角或导线网转变为测边或边角同测网,而大范围的垂直形变测量却仍然由精密水准测量承担。跨断层的测量种类较多,除了空间技术、常规大地测量技术外尚有应用水管倾斜仪、伸缩仪等的定点连续观测技术,并已向自动化无人值守方向发展。

地壳运动和形变的监测,具有重要的科学和经济意义。现代地壳运动和地壳应力场的研究,是地球动力学的一项重要内容。迄今为止,人类对自己居住的地球的外壳和内部的动力现象和机制的了解,远比对外围空间的了解要贫乏得多,而地壳的变化却与人类的安全和生存息息相关。地震就是构造应力场变化的结果,许多地质灾害的发生,成矿的分布和结构,大型工程,诸如水坝、核电站的安全,全球和局部海平面的变化造成的海浸等,都与地壳的形变密切相关。地壳的形变需要监测与研究,而大地测量方法仍然是当今能够提供足够有关信息的唯一手段,因此它是地球动力学研究的重要基础,并且在国民经济的规划、重大项目的建设以及防灾减灾中发挥着积极的作用。

现代地壳运动和形变是极其缓慢的,它只有用高精度的现代大地测量技术才能予以测定,因此大地形变测量的发展也推动了大地测量学本身的发展。首先它将古老的大地测量由“静态”推向了“动态”,这不仅是认识上的一个飞跃,而且相应的在基本理论、观测仪器、布网方案、施测方法、资料处理和分析上都发生了变化,面临一系列新的问题,开创了一个崭新的领域。其次,它使大地测量由一门观测科学向理论科学大大迈进了一步。大地形变测量所面临的问题,不仅是动态测量数据的获取和处理,而且包含有这些观测结果的地球物理解释。全球板块运动的监测和研究,就是一项地学的基础研究。它包含了全球动力学基本问题的探索和讨论,诸如板块的划分、运动的方式、边界的变形、动力学特征参数的计算、驱动力问题等,这无疑对地学的基本理论和今后发展至关重要。应用动态测量数据进行构造物理学解释,根据地表的形变或应变,推测作用于地壳的应力和地壳的结构,揭示形变形成的原因、机制和演变过程。这些都表明,大地形变的观测和研究,已开始由研究几何形态的变化深入到地壳物质的运动,由测定外表的现象进入到机制的探索,也即由运动学进入了动力学。可以说,大地形变测量是大地测量学、地球物理学、大地构造学和地球动力学等学科之间的一个边缘分支学科。

大地形变测量学,是近几十年才发展起来的一门年轻学科。从60年代开始,有关地球动力学的国际科学合作计划连续不断,有60年代的上地幔计划,70年代的地球动力学计划和80年代的岩石圈动力学和演化计划。大地形变测量作为其中一个必不可少的学科,发挥了重要的作用,也获得了迅速的发展。当前,大地形变测量已成为大地测量学中最活跃的一个领域,处于方兴未艾的时期。

(二)空间定位技术的发展

空间定位技术是指从地球外围空间或更远地方的物体上发射

或反射电磁波来确定地面上或近地空间点的位置的技术。现在广泛应用的空间定位技术有：

(1)子午卫星定位

子午卫星定位的基本原理是在地面点位置已知情况下,根据卫星发射的无线电信号的多普勒频移来确定卫星轨道,或在卫星位置已知情况下来确定地面点的位置。

整个子午卫星定位系统由三部分组成:卫星跟踪控制部分,卫星部分和用户部分。子午卫星是由美国加州穆古角的美国海军宇航大队控制的,控制部分包括四个跟踪站,两个注入站。跟踪站的观测值送至计算中心计算星历,由注入站将计算结果注入卫星,由卫星播放。目前有 6 颗卫星在正常工作,另有 1 颗储存在轨道上备用。卫星轨道呈圆型,高度 1100km,升交点均匀分布在赤道上,运行周期为 107min。

前苏联也有一种类似的子午卫星系统,称为 Tsicada。另外法国和美国合作搞的 Argos 系统也是利用多普勒原理的卫星定位系统,与子午卫星系统相反,它的发射机由用户使用,接收机则装在卫星上。

子午卫星定位系统精度一般较低,利用大地型双频接收机,例如用 CMA-722B, MX-1502 和 JMR-1 型接收机进行测量,卫星一次通过的定位精度为 $\pm 30\text{m}$ 左右,多次通过单点定位精度为 $\pm 3\sim 5\text{m}$,联测定位为 $\pm 1\text{m}$ 。多点短弧平差结果可优于 1m 。如采用精密星历则可达 $\pm 0.2\sim 0.3\text{m}$ 。在 70 年代,多普勒方法是大地测量空间定位最主要的方法,在确定大地起算数值时,其绝对定位的精度几乎比天文方法高一个数量级,并且其长距离测量时相对精度较高,可优于 1ppm ,因此被不少国家作为大地测量的基本控制。如美国在 1986 年 7 月完成的北美大地网(NAD83)整体平差中,就采用了约 650 个多普勒定位点。我国大陆的多普勒网观测,也在许多单位的共同努力下,于 1987 年基本完成,平差后相对精度优于 2ppm 。1988 年又利用卫星多普勒技术对南沙群岛、西沙群岛的部分岛屿与榆林和湛江的国家三角点进行了联测,其联测精度约为

$\pm 1\text{m}$ 。

利用多普勒技术的子午卫星系统今后在大地测量中的作用,很大程度上与 GPS 的发展有关。考虑到 GPS 工作卫星(Block II)全部布设完成后(大约 1993 年),美国国防部将开始实施“SA”方针,即精码保密,粗码降低到比子午卫星系统精度更差,将使 GPS 定位精度明显下降,这样作为绝对定位的手段,子午卫星系统将仍有其重要意义和不可取代的作用。

(2)激光测卫(SLR)

SLR 的基本原理是将一个强大的激光短脉冲,经过一台可调整的望远镜,射向一个携带有角反射镜的卫星,反射镜将信号反射回激光测距系统,根据激光信号往返所经历的时间,就可以确定测站至卫星的距离。

第一台 SLR 系统在 60 年代初开始工作。现在全世界固定的 SLR 系统已超过 25 台,此外还有十余台流动系统。我国 1972 年开始进行这方面的研究,到 1981 年先后在北京、上海、云南、广州、郑州、西安建立了我国第一代 SLR 系统,并从 1977 年开始陆续进行了联测,但只能观测低轨卫星,测距精度为 $1\sim 2\text{m}$ 。1983 年我国第二代测距系统在上海安装,观测到了距离地球 $6000\sim 7000\text{km}$ 的 Lageos 卫星,并参加了 MERIT 联测,精度达到了 $\pm 15\text{cm}$ 左右。1984 年西安和郑州的系统经过改进,达到第二代水平($\pm 15\sim 20\text{cm}$)。1984 年 10 月,上海—西安进行联测,精度好于 20m 。1985 年国家地震局研制的第二代 SLR 系统,观测 Lageos 卫星成功,精度为 $\pm 15\text{m}$ 左右,并开始进行第三代改进。MERIT 联测后,上海 SLR 站经改进在 1985 年实现了观测自动化,精度达到 $\pm 5\text{cm}$,进入国际先进的第三代行列。1987 年长春 SLR 站也完成改进工作,精度为 $\pm 5\sim 8\text{cm}$,也步入先进水平。而武汉站在 1990 年,更将测距精度提高到 $\pm 2\sim 3\text{cm}$ 。到 1989 年,我国共建成了上海、武汉、长春和北京四个具有第三代水平的 SLR 站,基线连测精度可达 $1\sim 2\text{cm}$ 。目前上海与武汉站对 Ajisai、Lageos 和 Etalon 等激光卫星进行常规观测,并向国际数据中心提供观测数据。近年来这两个站在计

算机控制系统方面有所改进,观测数量逐年增多。上海 SLR 站对 Lageos 卫星测距,最高一圈已获得 2800 多个回波。

目前多数 SLR 系统,都使用脉冲长度很短(100ps)的钕铝石榴石(YAG)激光器,以 532nm 波长输出,每个脉冲的功率为几个毫焦耳。某些系统仍然使用功率较大(每脉冲几个焦耳),脉冲宽度为几个 ns 的红宝石激光器,输出波长为 694nm。多数激光系统发射望远镜和接收望远镜是分开的,也有用同一个的。接收望远镜口径为 28~100cm 不等,接收灵敏度从一个光子到 100 个光子不等,一次测距的最佳精度约 1cm。例如奥地利格拉茨人卫站通过改进激光器的稳定性减少系统误差,最近对 Lageos 卫星一次测距精度已达 1.0~1.4cm。

为了进一步消除对流层折射的影响,美国正在研制双频激光测卫仪,预计可达毫米级精度。另一方面,空载激光测距系统经过近十年来断断续续地研究,取得明显进展,并有了初步结果。最近对数百公里的地面目标测量,已获得亚厘米级精度。

SLR 数据的处理通常用“动力法”。这是因为围绕地球旋转的卫星受地球重力场的影响使资料处理不单纯是一个几何学的问题。将许多激光测距站在 5~30 天内所收集的数据集中起来,同时解算出测站坐标、轨道根素和各种摄动引起的偏差。全球各测站间的基线测定精度可达 3~5cm,并可提供地球极移和自转参数的精确值。我国利用近几年来对 Lageos 卫星零星观测资料测定了上海、武汉、长春、西安 SLR 站的地心坐标,精度好于 20cm(其中上海站约为 10cm)。这些点是目前我国地心坐标精度最高的点,可作为精密大地测量的基准。

目前已有 15 颗装有逆向反射器的激光卫星在空中运行,其中最有名的是 Lageos 和 Starlette 卫星。这两颗卫星定轨时所用的重力场模型不同,前者用 GEML2,后者用 GPS-1331,目前还很难说哪一个模型更好。

全球有少数几个激光站也对月球进行测距,称为激光测月(LLR)。例如美国的得克萨斯和夏威夷站,测距精度为 $\pm 5\text{cm}$ 。激光

反射器是由美国的阿波罗 11 号、14 号、15 号及原苏联的两个遥控登月器安装在月球表面的。LLR 对于研究地月系统的各项参数及其变化有重要意义。J·Dickey 根据 LLR 资料求得许多结果,主要有:

①日(S)、月(M)、地(E)质量比, $S/E = 328900.591 \pm 0.003$;
 $E/M = 81.30058 \pm 0.00004$;

②引力常数 $GM = 398600.441 \pm 0.005$;

③岁差常数 $50''.3851/a$ (在 J2000.0 历元);

④章动常数 $\Delta\epsilon = 0.74\sin\epsilon_{\text{mas}}$, $\Delta\phi = 0.8\text{mas}$;

⑤春分点改正 $0''.0002$, 赤道改正 $0''.005$;

⑥月地距离变化 $3.7 \pm 0.20\text{m/a}$ 。

(3)甚长基线干涉测量(VLBI)

这是所有空间定位系统中最精确的一种。它利用波的干涉原理,类似于经典光学中的杨氏双缝实验。信号源通常是河外类星体或其它星系,由信号源传来的无线电信号通常是一些随机噪声,被多个射电望远镜的天线所接收,经放大并在一台氢原子钟控制下转换为低频信号,然后数字化,标上时间并记录在宽频带磁带上。这些信号以后在中央处理站上回放,处理器是一台由电子计算机控制的互相关器,它可对一对记录进行延迟和相乘,输出一个和杨氏实验中的干涉条纹相类似的互相关函数。

VLBI 的基本观测量是群延,即类星体波前到达射电望远镜的时间差。群延中最主要的分量是几何延迟 $\vec{C} = \vec{B} \cdot \vec{S}/c$ 。式中 $\vec{B}$ 为两射电望远镜之间的基线矢量, $\vec{S}$ 为射电源方向上的单位向量, c 为光速。通常用四个或更多个已知方向的射电源所获得的观测值,可求出基线矢量的三个分量和钟差。精度为几个厘米。

目前采用的记录终端为 Mark III 和 Mark III A,该系统使用 S 波段(2.2~2.3kHz)和 X 波段(8.2~8.6kHz)中的 14 个频率。使用两个波段可以进行电离层延迟改正。

大量的试验表明,VLBI 具有很高的精度,1km 基线三分量中误差小于 1cm,而几千公里测量精度好于 10^{-8} 。目前全球已在美国

马萨诸塞州、加利福尼亚州、西弗吉尼亚州、得克萨斯州,瑞典的翁萨拉,德国的波恩,日本、澳大利亚、西班牙等地建立了大尺度天线的 VLBI 观测站,定期进行联测。流动观测站(天线直径 9m 及 4m)也已研制成功并投入使用。最近美国解决了 VLBI 观测数据的高密度实时传输问题,因此有可能和 GPS 配合,建立一个全球性的动态实时大地监测网。

我国 1978 年开始实施 VLBI 工作。1981 年上海天文台和德国波恩 VLBI 站成功地进行了横跨欧亚大陆的基线测量,测程 8000km,精度为 2~3m。1985 年与日本鹿岛进行联测,测程 1800km,精度达 3cm。我国计划在上海、昆明、乌鲁木齐建立三个观测站和一个数据处理中心。其中上海的 VLBI 站已于 1987 年建成,位于佘山观象台,装备有 25m 口径的射电望远镜,Mark III 记录终端和氢原子钟,在与日本进行的首次联测中,精度达厘米级,时延精度达 0.1ns。我国将参加与美国宇航局(NASA)合作的地壳动力学计划(CDP)及国际地球自转服务(IERS)。近三年来与近十个国家的十多个 VLBI 站进行的国际联测表明,上海站观测数据的有效率和精度均已进入国际先进行列。

VLBI 的最新发展是空间 VLBI 技术的出现。1990 年美国将第一个射电望远镜发射到空间,进入了卫星轨道,并且与地面 VLBI 连测构成了 VLBI 整体网,这样原来以地面为基地的 VLBI 便扩展到了空间。美国 M·Kulkarni 研究了应用空间 VLBI 资料计算地球自转参数的问题,根据他推出的简化模型,计算结果的极位置误差约为 0.7 毫弧秒,自转参数误差约为 0.06 毫秒。

(4)全球定位系统(GPS)

GPS 是 1973 年由美国国防部开始研究开发的。它是一种以卫星为基础的无线电定位导航系统。在测量上的用途主要是相对定位,即求定地面点两点间的空间距离和方向,或所谓的三维坐标差。

GPS 系统主要由三个部分组成。空间部分由 18 颗卫星组成,分布在 6 个轨道面内,每个轨道面内均匀分布 3 颗,高度为

20183km,运行周期约 718min(0.5 恒星日),倾角 55° ,这样可以保证全球任一地点的用户在任意时刻至少能收到 4 颗 GPS 卫星的信号,卫星上安置有稳定度为 10^{-14} 的原子钟(铯钟)以及连续发射无线电信号的发射机,载波为 L 波段两个频率, $L_1=1575.42\text{MHz}$, $L_2=1227.6\text{MHz}$ 。采用三种伪随机噪声码(PRN)调制,这三种码分别称为 P(Precision)码,C/A(Clear and Acquisition)码和 Y 码。P 码用于精密定位和时间测量,又称“精码”,是保密的。C/A 码用于快速粗略定位,又称“粗码”或 S 码(Standard Positioning Service)。Y 码与 P 码类似,更为保密。将来可能代替 P 码。整个卫星发射工程将在 1993 年完成。

控制部分包括一个主控站、三个注入站和五个监控站。这些站原都设在美国本土上,近几年变更为科罗拉多斯普林斯(美)、夏威夷(美)、阿森松岛(英、南大西洋)、迭戈加西亚(印度洋)、夸贾林(南太平洋)等地,这进一步提高了精密星历计算和轨道预报的精度。

用户部分由天线、接收机、数据处理机和控制/显示装置组成。目前已有几十种(包括用于精密大地定位的)型号产品问世。

常用的 GPS 定位方法有:

- ①伪距法;
- ②多普勒法;
- ③载波相位法;
- ④干涉测量法。

绝对定位的精度为米级,相对定位精度约为 $2\sim 0.1\text{ppm}$ 。由于 P 码的保密,并且 1993 年正式运行后,精码将不再向民用开放,因此目前国外有些学者认为,使用非码接收机和粗码接收机将是今后的主流,应在观测方法和软件的改进方面下功夫。

为了满足高精度定位的需要,目前一些国家正在致力于新的 GPS 接收机的研制。新的接收机特点是:同时跟踪多颗卫星,可按“有码”及“无码”两种方式工作,同时进行 C/A 码、P 码的伪距观测及 L_1 、 L_2 载波的相位观测,并采用先进的数字信号处理技术。例

如,美国的 Motorola 公司研制的 Monarch GPS 接收机,可同时接收 6 颗卫星信号,P 码伪距观测精度为偶然误差 13cm,系统误差小于 1cm;载波相位测量偶然误差为 2mm,系统误差可忽略不计。又如美国 JPL 研制的 Rogue GPS 接收机,可同时跟踪 8 颗卫星,2 分钟 P 码伪距观测结果精度可达 10cm,30 分钟可达 5cm。目前该公司又进一步研制一种既可放在卫星上又可放在地面上进行观测的全数字 GGI 接收机,设计要求可跟踪全部 18 颗卫星,同时连续地进行 C/A 码、P 码伪距观测及 L_1 、 L_2 载波相位观测,预计精度为:伪距观测偶然误差小于 15cm,系统误差小于 1cm,载波观测则小于 0.5mm 及 0.1mm。如用于卫星定轨,将提供精度为 1m 的实时定位及大约 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的姿态控制,事后处理,可获得 $1\sim 3\text{cm}$ 的定位精度及 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的姿态精度。

GPS 定位精度与 GPS 卫星星历精度有密切关系,目前 GPS 卫星广播星历(C/A 码)的精度大约为 20m,而由 P 码提供的精密星历约在 2m 左右。这样,对相对定位精度影响约为 $10^{-6}\sim 10^{-7}$ 。如美国开始“SA”政策,则广播星历精度将降至 100m 以下,这样对定位精度影响将大于 10^{-6} ,这就迫使许多用户考虑自己独立或联合建立全球或局部地区的 GPS 跟踪网,以提供所需的 GPS 精密星历。这要求有分布均匀的众多 GPS 跟踪站以及合理的有效的资料计算处理技术。美国 NAVSWC 从 1987 年 8 月开始应用全球分布的 10 个跟踪站的伪距资料。使用“多卫星卡尔曼滤波平滑软件系统”计算 GPS 精密星历和卫星钟差。美国 NGS 牵头的国际 GPS 合作网(CIG NET),现已利用相位观测资料代替伪距观测资料进行定轨计算,将卫星定轨精度提高到了分米级。而以美国俄亥俄大学 Mueller 教授为首组织发起成立国际 GPS 地球动力学服务——IGS,将建立跟踪网、数据中心和数据分析中心,计划从 1993 年开始提供精密卫星星历、地面参考系、地球自转和定向参数、全球和局部地壳运动信息。

GPS 定位是一种正在发展中的全天候、高精度、快速实时定位系统。它具有覆盖范围广、信号可靠、数据内容丰富、准确度高、多