

高职高专土建类精品规划教材

● GPS测量原理与方法 ●

主 编 黄文彬
副主编 聂琳娟 卢满堂 赵飞燕
主 审 牛志宏



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材是高职高专院校 GPS 测量课程教材, 主要讲述 GPS 定位原理、GPS 测量技术的设计方法与外业测量实施的基本技能以及 GPS 测量数据的处理方法。此外, 还补充了 GPS 原始数据的解析方法, 对 GPS 技术在工程控制测量中的应用也作了简要介绍。全书共分 9 章, 第 1~6 章主要讲解 GPS 技术的基本理论知识, 第 7 章、第 8 章主要讲解 GPS 测量技术的实际应用方法, 第 9 章为应用介绍。

本教材可作为高职高专院校水利类、测绘类或相关专业的教材, 也可作为测绘专业和从事定位与导航工作的科技人员及相关专业的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (C I P) 数据

GPS测量原理与方法 / 黄文彬主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 4
高职高专土建类精品规划教材
ISBN 978-7-5084-7382-6

I. ①G… II. ①黄… 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056043号

书 名	高职高专土建类精品规划教材 GPS 测量原理与方法
作 者	主 编 黄文彬 副主编 聂琳娟 卢满堂 赵飞燕 主 审 牛志宏
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 11 印张 261 千字
版 次	2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	23.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 是美国从 20 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, 赢得了广大测绘工作者的信赖并成功地应用于大地测量、工程测量、航空摄影测量、运载工具导航和管制、地壳运动监测、工程变形监测、资源勘察、地球动力学等多种学科, 从而给测绘领域带来了一场深刻的技术革命。由于 GPS 技术具有全天候、高精度和自动测量的特点, 作为先进的测量手段和新的生产力已经融入了国民经济建设、国防建设和社会发展的各个应用领域。因此, GPS 技术应用的专业知识已成为测量工程等工科专业的学生所必修的一门课程。

为了满足高职高专院校开设 GPS 课程的教学需要, 考虑到高职高专学生的实际情况, 本教材对 GPS 技术用于定位的基本原理、方法和技术用通俗的语言做了介绍, 重点讲述了 GPS 测量技术的设计方法与外业测量实施的基本技能以及 GPS 测量数据的处理方法, 以便学生通过本课程的学习, 能较好地掌握 GPS 技术用于工程测量的基本技能, 为今后从事水利工程规划设计、勘测施工及管理打下基础。

本教材主要介绍了全球定位系统 (GPS) 的基础知识及卫星定位技术的发展概况, 包括 GPS 系统的组成、与卫星定位相关的坐标系统和时间系统、卫星运动基础及 GPS 卫星星历、GPS 卫星定位原理、GPS 卫星定位的误差来源及其影响、GPS 测量技术设计与外业实施的方法、GPS 测量数据的处理方法等方面的知识。此外, 为提高学生对数据的处理能力, 使学生毕业后能更好地利用 GPS 技术为其他行业服务, 拓展学生对 GPS 技术应用的视野和空间, 本教材还专门针对 GPS 测量原始数据的解析方法做了比较详细的介绍, 包括数据的传输与存储方法; 导航用的 NMEA-183 数据格式、不同型号 (不同种类) 接收机联合测量时数据处理需用到的 RINEX (通用交换) 数据格式的数据解析方法, 这部分内容可根据学生实际情况补充讲解。另外, 本教材还对 GPS 技术在几种工程控制测量中的应用作了简要介绍。

本教材由浙江水利水电专科学校黄文彬任主编, 并负责教材内容的策划和统稿, 湖北水利水电职业技术学院聂琳娟、山西水利职业技术学院卢满堂、杨凌职业技术学院赵飞燕任副主编。全书共分 9 章, 第 1 章由长江工程职业技术学院罗勇编写, 第 2 章由聂琳娟编写, 第 3 章由赵飞燕编写, 第 4 章由黄文彬编写, 第 5 章由卢满堂编写, 第 6 章由华北水利水电学院水利职业学院张新盈编写, 第 7 章由黄文彬和浙江水利水电专科学校陈熙祥编写, 第 8 章由黄河水利职业技术学院陈慧编写, 第 9 章由黄文彬和浙江水利水电专科学校

许昌编写，长江工程职业技术学院牛志宏任本教材的主审。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，热忱希望广大读者对书中的缺点和错误给予批评指正。

编者

2010年3月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星定位技术的发展概况	1
1.2 GPS 的应用	5
1.3 GPS 的特点	11
思考题	12
第 2 章 坐标系统和时间系统	13
2.1 协议天球坐标系	13
2.2 协议地球坐标系	16
2.3 我国大地坐标系	19
2.4 WGS-84 坐标系	20
2.5 坐标系的换算	21
2.6 GPS 测量的时间系统	22
思考题	25
第 3 章 卫星运动基础及 GPS 卫星星历	26
3.1 概述	26
3.2 卫星的无摄运动与受摄运动	26
3.3 GPS 卫星星历	29
3.4 GPS 卫星信号	31
3.5 美国政府关于 GPS 卫星信号的 SA 政策	32
思考题	34
第 4 章 GPS 测量原始数据的解析	35
4.1 GPS 数据的格式解析	35
4.2 数据的传输与存储	48
第 5 章 GPS 卫星定位原理	56
5.1 概述	56
5.2 伪距测量与整周模糊度的处理	57
5.3 绝对定位原理	65
5.4 相对定位原理	70
5.5 差分定位原理	74

思考题	79
第 6 章 GPS 卫星定位的误差来源及其影响	80
6.1 GPS 测量的主要误差及分类	80
6.2 与卫星有关的误差	81
6.3 卫星信号传播误差	83
6.4 接收设备误差与图形强度	87
6.5 其他误差来源	91
思考题	92
第 7 章 GPS 测量技术设计与外业实施	93
7.1 GPS 测量的技术设计	93
7.2 GPS 测量的技术设计书编写及外业准备	103
7.3 GPS 测量的外业实施	107
7.4 技术总结与资料上交	116
思考题	117
第 8 章 GPS 测量数据处理	118
8.1 数据预处理	119
8.2 GPS 基线向量的解算	122
8.3 GPS 控制网的平差	136
8.4 GPS 高程	144
思考题	151
第 9 章 GPS 在控制测量中的应用	153
9.1 GPS 在大地控制测量中的应用	153
9.2 GPS 在城市控制测量中的应用	154
9.3 GPS 在隧道贯通控制测量中的应用	156
9.4 GPS 在桥梁施工控制测量中的应用	158
9.5 GPS 在水电工程施工控制测量中的应用	161
9.6 GPS 在公路施工控制测量中的应用	164
9.7 GPS 在铁路施工控制测量中的应用	166

第1章 绪论

1.1 卫星定位技术的发展概况

1.1.1 早期的卫星定位技术

1957年世界上第一颗人造地球卫星发射成功，这是人类致力于现代科学技术发展的结晶，它使空间科学技术的发展迅速跨入了一个崭新的时代。卫星定位技术是利用人造地球卫星进行点位测量的技术。早期的人造地球卫星仅作为一种空间的观测目标，由地面观测站对它进行摄影测量，测定测站到卫星的方向，建立卫星三角网；也可以利用激光技术对卫星进行距离测量，测定测站至卫星的距离，建立卫星测距网。这种对卫星的几何观测能解决用常规大地测量技术难以实现的远距离陆地与海岛的联测定位问题。20世纪60~70年代，美国国家大地测量局在英国和德国测绘部门的协助下，花了几年的时间用卫星三角测量的方法测设了包含45个测站的全球三角网，点位精度可达5m。但是这种观测方法受天气和卫星可见条件的影响较大，费时费力，不仅定位的精度低，而且不能测定点位的地心坐标。因此，卫星三角测量很快被利用卫星多普勒效应（Doppler effect）的定位技术所取代，使卫星定位技术从把卫星作为空间观测目标的低级阶段，发展到了把卫星作为动态已知点的高级阶段。

1.1.2 卫星多普勒定位技术

多普勒效应（图1.1）是为纪念奥地利物理学家及数学家克里斯琴·约翰·多普勒

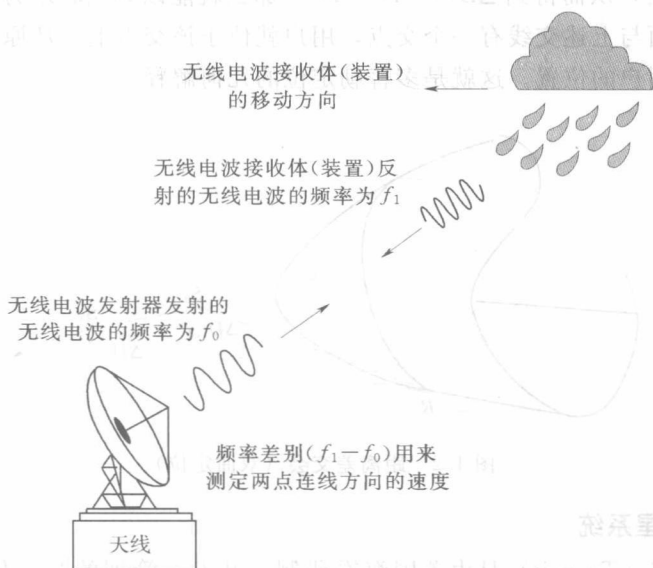


图 1.1 多普勒效应



(Christian Johann Doppler) 而以其名字命名的, 多普勒于 1842 年首先提出了这一理论。当声音、光和无线电波等振动源与观测者以相对速度 v 相对运动时, 观测者所收到的振动频率与振动源所发出的频率有所不同。因为这一现象是多普勒最早发现的, 所以称之为多普勒效应。由多普勒效应所形成的频率变化叫做多普勒频移, 它与相对速度 v 成正比, 与振动的频率 f 成反比。

根据多普勒原理, 当信号源 (卫星) S 和信号接收处设备 R 做相对运动时, 接收处设备接收到的信号频率 f_R 与信号源发射的频率 f_S 不等。多普勒定位技术就是根据这个原理产生的, 它的设想是: 若已知在轨卫星的轨道参数, 地面观测者又测得该颗卫星发射信号的多普勒频移, 则可计算出测站的坐标。该设想即为第一代卫星导航定位系统的基本工作原理。其几何意义如下: 设卫星 S' 以频率 f_S 连续发射信号。在 t_1 时刻卫星位于 S_1 处, 在 t_2 时刻卫星位于 S_2 处。若利用地面跟踪站对卫星 S' 进行了观测并确定了该卫星的运行轨道 (即已知任时刻卫星 S' 在空间的位置), 同时又对该卫星进行了多普勒测量, 测得卫星 S' 发射信号的多普勒频移, 即 S_1 的多普勒频移 $(f_0 - f_1)$ 和 S_2 的多普勒频移 $(f_0 - f_2)$, 求得 $[t_1, t_2]$ 时段中的多普勒计数 $N_{1,2}$, 有:

$$\Delta D_{1,2} = D_2 - D_1 = \lambda_S [N_{1,2} - (f_0 - f_S)(t_2 - t_1)]$$

由于卫星信号源静止时发射的信号的波长 λ_S 和 f_S 以及 f_0 、 t_1 、 t_2 均为已知值, N 为多普勒测量中的观测值, 故 $\Delta D_{1,2} = D_2 - D_1$ 也已间接被测定。而 t_1 和 t_2 时刻卫星在空间的位置 S_1 和 S_2 可据卫星轨道求得, 也是已知的。故用户 (接收机) 必位于以 S_1 和 S_2 为焦点的一个旋转双曲面上, 该曲面上任一点至 S_1 和 S_2 的距离差均等于 $\Delta D_{1,2}$ (图 1.2)。类似地, 如果也求得在 $t_2 \sim t_3$ 时段内的多普勒计数 $N_{2,3}$ 进而间接求得了 $\Delta D_{2,3} = D_3 - D_2$, 则可以以 S_2 和 S_3 为焦点作出第二个旋转双曲面, 该曲面上任一点至 S_2 和 S_3 的距离均等于 $\Delta D_{2,3}$ 。显然用户必位于这两个旋转双曲面的交线上。同样如果我们继续进行多普勒测量, 测得 $N_{3,4}$, 从而得到 $\Delta D_{3,4} = D_4 - D_3$, 那么就能以 S_3 和 S_4 为焦点作出第三个旋转双曲面。该曲面与上述交线有一个交点, 用户就位于该交点上。从原理上讲用三个旋转双曲面就可交出用户的位置。这就是多普勒定位的几何解释。

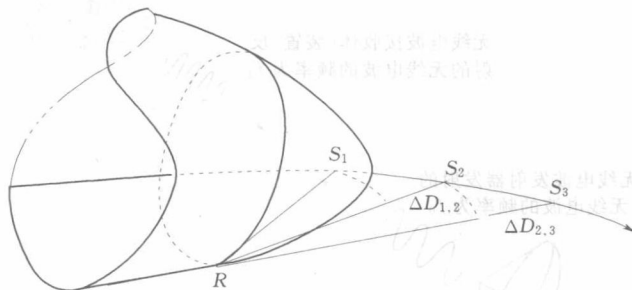


图 1.2 距离差交会 (双曲定位)

1.1.3 子午仪卫星系统

子午卫星系统 (Transit) 是由美国海军研制、开发、管理的第一代卫星导航定位系统, 也称海军导航卫星系统 (NNSS: Navy Navigation Satellite System)。该系统是采用



多普勒测量来定轨和定位的。

1957年10月苏联成功地发射了第一颗人造地球卫星。美国约翰·霍普金斯大学的应用物理实验室的吉尔博士和魏芬巴哈博士对该卫星发射的无线电信号的多普勒频移产生了浓厚的兴趣。他们的研究表明利用地面跟踪站上的多普勒测量资料可以精确确定卫星轨道。在实验室工作的另两位科学家麦克卢尔博士和克什纳博士则指出对一颗轨道已准确确定的卫星进行多普勒测量可以确定用户的位置。他们的工作为子午卫星系统的诞生奠定了基础。而当时美国海军正在寻求一种可对北极星潜艇中的惯性导航系统进行间断的精确的修正方法,故积极资助应用物理实验室开展进一步的深入研究。1958年12月在克什纳博士的领导下开展了三项研究工作:①研制卫星;②建立地球重力场模型以便能准确确定和预报卫星轨道;③研制多普勒接收机。1964年1月子午卫星系统正式建成并投入军用。1967年7月该系统解密供民用。此后用户数激增,最终达9.5万个用户。而军方用户最多时只有650个,不足总数的1%。

1.1.4 全球定位系统(GPS系统)

GPS系统包括三大部分:空间部分——GPS卫星星座;地面控制部分——地面监控系统;用户设备部分——GPS信号接收机。

1. GPS工作卫星及其星座

由21颗工作卫星和3颗在轨备用卫星组成GPS卫星星座(图1.3),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° ,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° 。

在2万km高空的GPS卫星,当地球对恒星(如太阳)来说自转1周时,它们绕地球运行2周,即绕地球1周的时间为12恒星时。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。位于地平线以上的卫星颗数随着时间和地点的不同而不同,最少见到4颗,最多可以见到11颗。在利用GPS信号导航定位时,为了解算测站的三维坐标,必须观测4颗以上数目的GPS卫星,这些卫星合起来称为定位星座。这4颗(或4颗以上)卫星在观测过程中的几何位置分布对定位精度有一定的影响。对于某地某时,甚至不能测得精确的点位坐标,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、连续实时的导航定位测量。

GPS工作卫星的编号和试验卫星基本相同。其编号方法有:①按发射先后次序编号;②按PRN(卫星所采用的伪随机噪声码)的不同编号;③NASA编号(美航空航天局对GPS卫星的编号);④国际编号(第一部分为该星发射年代,第二部分表示该年中发射卫星的序号,字母A表示发射的有效负荷);⑤按轨道位置顺序编号等。在导航定位测量中,一般采用PRN编号。

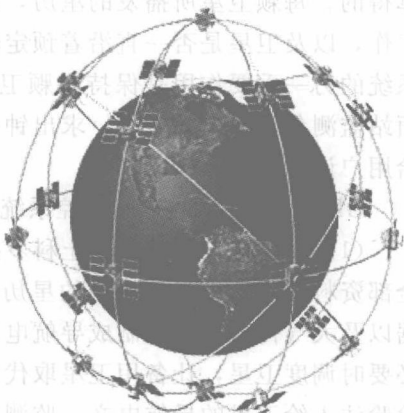


图1.3 卫星星座



在 GPS 系统中, GPS 卫星的作用如下:

- (1) 用 L 波段的两个无线载波(波长为 19cm 和 24cm)向广大用户连续不断地发送导航定位信号。每个载波用导航信息 $D(t)$ 和伪随机码测距信号进行双向调制。用于捕获信号及粗略定位的伪随机码叫 C/A 码,精密测距码叫 P 码。由导航电文可以知道当前卫星的位置和卫星的工作情况。
- (2) 在卫星飞过注入站上空时,接受由地面注入站用 S 波段发送到卫星的导航电文和其他有关信息,并通过 GPS 信号电路,适时地发送给广大用户。
- (3) 接收地面主控站通过注入站发送给卫星的调度命令,适时地改正运行偏差或启用备用时钟等。

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度精确的时钟提供。因为 10^{-9} s 的时间误差将会使测站与卫星之间距离的测量误差达到 30cm。为此每颗 GPS 工作卫星一般安设两台铯原子钟,并计划未来使用更稳定的氢原子钟。

2. 地面监控部分

对于导航定位来说, GPS 卫星是一动态已知点。星的位置是依据卫星发射的星历来算得的。每颗卫星所播发的星历,是由地面监控系统提供的。卫星上的各种设备是否正常工作,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。地面监控系统的另一重要作用是保持各颗卫星处于同一时间标准——GPS 时间系统。这就需要地面站监测各颗卫星的时间,求出钟差,然后由地面注入站发给卫星,卫星再由导航电文发给用户设备。

GPS 工作卫星的地面监控系统包括 1 个主控站、3 个注入站和 5 个监测站。

- (1) 主控站设在美国本土科罗拉多。主控站的任务是收集、处理本站和监测站收到的全部资料,编算出每颗卫星的星历和 GPS 时间系统,将预测的卫星星历、钟差、状态数据以及大气传播改正编制成导航电文传送到注入站。主控站还负责纠正卫星的轨道偏移,必要时调度卫星,让备用卫星取代失效卫星。另外还负责监测整个地面监测系统的工作,检验注入给卫星的导航电文,监测卫星是否将导航电文发送给了用户。

- (2) 3 个注入站分别设在大西洋的阿森松岛、印度洋的迭哥加西亚岛和太平洋的卡瓦加兰。任务是将主控站发来的导航电文注入到相应的卫星存储器。每天注入 3 次,每次注入 14 天的星历,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。

- (3) 5 个监测站除了位于主控站和 3 个注入站之处的 4 个站以外,还在夏威夷设立了一个监测站。监测站的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 信号接收机对每颗可见卫星每 6min 进行一次伪距测量和多普勒观测,采集气象要素等数据。在主控站的遥控下自动采集定轨数据并进行各项改正,每 15min 平滑一次观测数据,依此推算出每两分钟间隔的观测值,然后将数据发送给主控站。

3. GPS 接收机

GPS 信号接收机(图 1.4)的任务是能够捕获到一定卫星高度截至角所选择的待测卫星的信号,并跟踪这些卫星运行,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 卫星发送的导航电文,实



时地计算出测站的三维位置,甚至三维速度和时间。静态定位中, GPS 接收机在捕获和跟踪 GPS 卫星的过程中固定不变,接收机高精度地测量 GPS 信号的传播时间,利用 GPS 卫星在轨的已知位置,解算出接收机天线所在位置的三维坐标。而动态定位则是用 GPS 接收机测定一个运动物体的运行轨迹。GPS 信号接收机位于的运动物体叫做载体。载体上的 GPS 接收机天线在跟踪 GPS 卫星的过程中相对地球而运动,接收机用 GPS 信号实时地测得运动载体的状态参数。

接收机硬件和机内软件以及 GPS 数据的后处理软件包,构成完整的 GPS 用户设备。GPS 接收机的结构分为天线单元和接收机单元两大部分。对于测地型接收机来说,两个单元一般分为两个独立的部件,观测时将天线单元安置在测站上,接收机单元位于测站附近的适当的地方,用电缆线将两者连接成一个整机,也有的将天线单元和接收单元制作成一个整体,观测时将其安置在测站上。

接收机可同时采用机内机外两种直流电源。设置机内电池的目的是更换外电池时不中断连续观测。在用机外电池的过程中,机内电池自动充电。关机后,机内电池为 RAM 存储器供电,以防止丢失数据。



图 1.4 GPS 接收机

一般来说,精密定位是测地型接收机采用相对定位法定位,双频接收机的精度可达 $5\text{mm} + 1\text{ppm} \times \text{基线长度}$,单频接收机在一定的距离内精度可达 $10\text{mm} + 2\text{ppm} \times \text{基线长度}$ 。

为便于观测,目前各种类型的 GPS 接收机的体积越来越小、重量越来越轻。GPS 和 GLONASS 兼容的全球导航定位系统接收机也早已问世。

1.2 GPS 的应用

GPS 技术的发展,不仅在于系统硬件和软件自身的开发与完善,而且在于和其新技术结合,构成功能更完善、性能更可靠、应用更广泛的综合系统。下面仅就 GPS 测量技术在水利工程方面的应用作一简单介绍。

1.2.1 GPS 在水利技术上的应用

GPS 与自动化测探系统相结合,将使导航定位与水深测量达到高度的一体化和自动化,为湖泊、河道和近海水域的断面测量,水下地形测量和水域淤积测量提供一种精确高效的新手段。利用 GPS 静态定位和快速静态定位模式建立测量控制网,进行水利工程测量,速度快、精度高,可有效解决丘陵、森林、建筑物等造成的遮视问题。水利枢纽工程运行管理过程中,利用 GPS 技术建立大坝安全监测系统,可以对大坝的稳定性进行实时连续监测,保证水利枢纽安全运行。

多用途的空间定位理论与方法,随着系统的自身发展及与一些高新技术的结合,将在各个领域得到更广泛的应用,在水利工程测量工作中更有推广和应用的价值。



1.2.2 GPS在移动目标导航中的应用

GPS定位技术，主要是为满足运动目标实施三维精密导航的要求而发展起来的。GPS导航技术的出现，是航空、航海史上导航技术的重大突破。GPS定位技术在导航方面应用的特点是其必须满足实时与动态定位的要求，因此目前GPS定位技术，一般大都以测码伪距为观测量，并根据用户对导航精度的要求，采用定位或相对定位原理，为运动载体提供精确位置，并在数字化航行图和地图上显示，从而选择载体航行的最佳路线，以节约燃料，缩短航行时间。目前它在海上、空中和陆地运动目标的导航、监控和管理等方面的应用已非常广泛。

1.2.2.1 GPS航海导航应用

GPS航海导航按航路类型可分远洋导航、海岸导航、港口导航、内河导航、湖泊导航五大类，不同阶段或区域，对航行安全和导航精度要求也因环境不同而各异，但目的均是为了保证航行安全，提高交通运输效益，节约能源。GPS航海导航系统功能一般可分为以下几类：

(1) 自主导航。自主导航系统适于上述航路的任何一种，它基本上是一种单纯的导航系统，其主要特征是仅向用户提供位置、航速、航向和时间信息，也可包括海图航迹显示，不需通信系统。适应于任何海面、湖面和内河上航行的船舶，从大型远洋货轮到私人游艇。

(2) 港口管理和进港引导。这种系统主要用在港口、码头，用于港口、码头的船舶调度管理、进港船舶引导，以确保港口码头航行的安全和秩序。该系统需要双向数据、话音通信，以便于港区情景浏览、海图显示和领航员引导船舶，以标明停泊的船舶和可利用的进港航线，避免冲撞。这种系统对导航系统的精度要求高，通常采用差分GPS技术和其他增强技术。

(3) 航路交通管理系统。这类系统主要用于近海和内陆河航路上的船舶导航和管理，通常需要卫星通信系统的支持。

(4) 跟踪监视系统。这类系统主要用于海上巡逻艇、稽私艇及各种游艇，特别是需要防盗的私人游艇。根据具体的使用对象，有些系统需要给出导航参数和双向数据/话音通信，如稽私艇。而有时则不需要给出导航参量，如用于私人游艇防盗，仅需要单向数据通信，一旦发生被盗，游艇上的导航系统不断把自己的位置和航向送到有关中心，以便于跟踪。

(5) 紧急救援系统。系统也包括两栖飞机、直升机和陆地车辆。它适应于上述几种航路，用于搜寻和救援各种海面、湖面，内河上的遇险、遇难船舶和人员。这类系统需要双向数据、话音通信，要求响应时间快、定位精度高。

(6) GPS/声呐组合用于水下机器人导航。该类组合系统可用于水下管道铺设和维修，水文测量以及其他海下作业，如用于港口、码头水下勘测，以便于进场航道阻塞物清除，保证航道畅通，也可用于远洋捕捞、渔船作业引导等。

1.2.2.2 GPS航空导航应用

GPS定位技术为全球航空无间隙导航和监视提供了主要的技术支持，GPS航空导航按航路类型或飞行阶段划分，涉及洋区空域航路、内陆空域航路、终端区导引、进场/着



陆、机场场面监视和管理等方面，在不同的航路段及不同的应用场合，对导航系统的精度、完善性、可用性、服务连续性的要求不尽相同，但都要保证飞机飞行安全和有效利用空域。

按照机载导航系统的功能划分，GPS 在航空导航中的应用表现在以下几个方面：

(1) 航路导航。航路主要指洋区和大陆空域航路。各种研究和实验已经证明，GPS 和一种称之为接收机自主完善性监测的技术能满足洋区航路对 GPS 的导航精度、完善性和可用性的要求，而且精度也能满足大陆空域航路的要求，GPS 和广域增强系统也能满足大陆空域航路对精度、完善性和可用性的要求。GPS 的精度远优于现有任何航路用导航系统，这种精度的提高和连续性服务的改善有助于有效利用空域，实现最佳的空域划分和管理、空中交通流量管理以及飞行路径管理，为空中运输服务开辟了广阔的应用前景，同时也降低了营运成本，保证了空中交通管制的灵活性。GPS 的全球、全天候、无误差积累的特点，更是中、远程航线上目前最好的导航系统。按照国际民航组织的部署，GPS 将逐渐替代现有的其他无线电导航系统。GPS 不依赖于地面设备，可与机载计算机等其他设备一起进行航路规划和航路突防，为军用飞机的导航增加了许多灵活性。

(2) 进场及着陆。GPS 及其广域增强系统完全满足非精密进场及着陆对精度、完善性和可用性的要求；结合局域伪距差分技术/系统增强，能满足各类精密进场的要求。可以肯定，各种增强和组合系统与 GPS 将成为进场及着陆的主要手段，仪表着陆将最终被取代。由于 GPS 着陆系统设备简单、无需配置复杂的地面支持系统，它将适合于任何机场，包括私人机场和山区机场。理论上，GPS 着陆系统可以引导飞机沿着任意一条飞行剖面 and 进场路径着陆，这就增强了各种机场着陆的灵活性和盲降能力。

(3) 场面监视和管理。包括终端飞行管理和机场场面监视、管理。场面监视和管理的目的就是要减少起飞和进场滞留时间，监视和调度机场的飞机、车辆和人员，最大效率地利用终端空间和机场，以保证飞行安全。GPS、数字地图和数字通信链为开发先进的场面导航、通信和监视系统提供了全新的技术，可以确信，基于 GPS 及数字地图的场面监视和管理将为机场带来很多效益。

(4) 航路监视。GPS 和航空移动卫星系统的出现，改变了传统的利用各种雷达和机载导航设备进行的非相关监视方法，实现全球覆盖和全球无间隙监视，目前机载 GPS 导航系统通过通信链自动报告自己位置的这种“自动相关监视系统 (ADS)”已经提出。其演示和实验已经证明 ADS 为飞行各阶段的监视都会带来益处，特别是为洋区和内陆边远地区空域实现自动监视业务提供了机会。ADS 也为飞行员与管制人员之间的双向数据传输和数字话音通信提供了可能。这有效地减轻了飞行员与管制人员的工作负担，同时也增加了 ATM 的灵活性。

总之，GPS 定位技术在导航方面的应用，是一个内容极为丰富，范围十分广阔领域的，特别当其和数据传输与通信技术相结合时，充分地显示了这一导航技术的巨大潜力和广泛的应用前景。

1.2.3 GPS 在海洋测绘中的应用

海洋测绘包括海上定位、海洋大地测量和海底地形测量。海上定位通常指在海上确定



船的位置的工作。主要用于舰船导航,同时又是海洋大地测量不可缺少的工作。海洋大地测量主要包括在海洋范围内布设大地控制网,进行海洋重力测量。在此基础上进行水下地形测量,测绘水下地形图,测定海洋大地水准面。此外海洋测绘的工作还包括海洋划界、航道测量以及海洋资源勘探与开采、海底管道的敷设、近海工程、打捞、疏浚等海洋工程测量。

海上定位是海洋测绘中最基本的工作。由于海域辽阔,海上定位可根据离岸距离的远近而采用不同的定位方法,如光学交会定位、无线电测距定位、GPS 卫星定位、水声定位以及组合定位等。此处仅讨论 GPS 卫星定位技术在海洋定位、海洋大地控制网的建立以及水下地形测绘等方面的应用。

1.2.3.1 用 GPS 定位技术进行高精度海洋定位

为了获得较好的海上定位精度,需要利用 GPS 接收机与船上的导航设备组合起来进行定位。目前,使用最多、发展最快的是以 GPS 接收机与各种导航设备如罗兰—C、水声应答系统等组合起来的组合导航定位系统。

对于近海海域,还可采用在岸上或岛屿上设立基准站,采用差分技术或动态相对定位技术进行高精度海上定位。如果一个基准站能覆盖 1500km 的范围,那么在我国沿海只需设立 3~4 个基准站便可在近海海域进行高精度海上定位。此外,不断成熟的广域差分技术,可以实现在一个国家或几个国家范围内的广大区域进行差分定位。

利用差分 GPS 技术可以进行海洋物探定位和海洋石油钻井平台的定位。进行海洋物探定位时,在岸上设置一个基准站,另外在前后两条地震船上都安装差分 GPS 接收机。前面的地震船按预定航线利用差分 GPS 导航和定位,按一定距离或一定时间通过人工控制向海底岩层发生地震波,后续船接收地震反射波,同时记录 GPS 定位结果。通过分析地震波在地层内的传播特性,研究地层的结构,从而寻找石油资源的储油构造。根据地质构造的特点,在构造图上设计钻孔位置。利用差分 GPS 技术按预先设计的孔位建立安装钻井平台,具体方法是在钻井平台上和海岸基准站上设置差分 GPS 系统。如果在钻井平台的四周都安装 GPS 天线,由四个天线接收的信息进入同一个接收机,同时由数据链电台将基准站观测的数据也传送到钻井平台的接收机上。通过平台上的微机同时处理五组数据,可以计算出平台的平移、倾斜和旋转,以实时监测平台的安全性和可靠性。

1.2.3.2 GPS 技术用于建立海洋大地控制网

建立海洋大地控制网,为海面变化和海底地形测绘、海洋资源开发、海洋工程建设、海底地壳运动的监测和舰船的导航等服务是海洋大地测量的一项基本任务。海洋大地控制网,是由分布在岛屿、暗礁上的控制点和海底的控制点组成的。海底控制点由固定标志和水声应答器构成。

对于岛、礁上的控制点定位,可用 GPS 相对定位精确测定其在统一参考系中的坐标。我国已于 1990 年和 1994 年在西沙群岛和南沙群岛的岛、礁上布设了平均边长相对中误差为 $1/3870000$ 、方位中误差为 $\pm 0.06''$ 、点位中误差为 $\pm 13\text{cm}$ 的 GPS 控制网,并完成了与海口、湛江、东莞等国家大地点的联测。而对于测定海底控制点的位置,则需要借助于船台或固定浮标上的 GPS 接收机和水声定位设备,对卫星和海底控制点进行同步观测而



实现。

如图 1.5 所示, T_0 为设在海岸或岛礁上的基准点; T_1, T_2, \dots, T_i 为海底控制点; $P_k(t)$ 为测量船上 GPS 接收机的瞬时位置, 可以通过 GPS 相对动态定位而精确确定。在用 GPS 接收机同步观测 GPS 卫星进行定位的同时, 利用海底水声应答器同步测定了 $P_k(t)$ 至 T_i 之间的距离 $S_{ki}(t)$, 则可得到距离观测方程为:

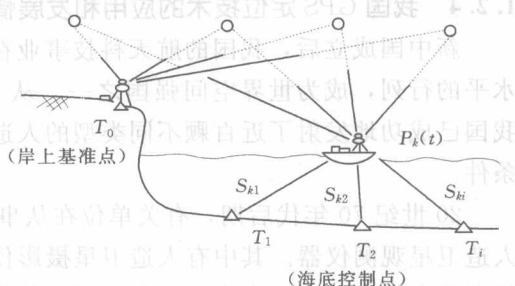


图 1.5 海底控制点

$$S_{ki}^2 = [X_k(t) - X_i]^2 + [Y_k(t) - Y_i]^2 + [Z_k(t) - Z_i]^2$$

式中: $(X_k(t), Y_k(t), Z_k(t))$ 为 GPS 接收机的坐标; (X_i, Y_i, Z_i) 为海底控制点的待定坐标。

船只移动进行多次观测, 有三个以上历元的同步观测结果, 便可以通过平差的方法确定海底控制点的位置。

1.2.3.3 GPS 在水下地形测绘中的应用

海上航运、海洋渔业资源的开发, 沿海地区养殖业、海上石油工业以及海底输油管道和海底电缆工程, 还有其他海洋资源的勘探与开发、水下潜艇的活动等都离不开水下地形图的测绘。

水下地形测量的基础为海道测量。如上所述, 海底控制测量确定海底点的三维坐标或平面坐标。而水下地形测量还要利用水声仪器测定水深。水深测线间距依比例尺不同而变化, 而水深仪器的定位控制除了近岸测量或江河测量可使用传统的光学仪器实施交会法定位外, 其他较远区域多采用无线电定位。GPS 卫星定位技术的应用, 可以快速高精度地测定水声仪器的位置。GPS 单点定位精度为几十米, 只可作为远海小比例尺海底地形测量的控制。对于较大比例尺测图, 可应用差分 GPS 技术进行相对定位。

实际应用中将 GPS 接收机与水声仪器组合, 前者进行定位测量, 后者同时进行水深测量, 再利用电子记录手簿, 利用计算机和绘图仪便可组成水下地形测量自动化系统。近 20 年来在国内外有多种自动化系统成品生产。如美国的 IMC 公司生产的 HydroI 型自动定位系统, 野外有两人便可完成岸上和船上的全部操作。当天所测数据 1~2h 可处理完毕, 并可即时绘出水深图、测线断面图、水下地形模型等。

1992 年, 大连舰艇学院研制成功了 HSD-001 型 GPS 海上动态测量定位系统。该系统是在 GPS 接收机的基础上, 由配套差分基准台、无线电传输设备和一系列软件组成。一个基准台可供任意一个船台进行差分定位。基准台的作用是向船台发送一系列差分定位改正数。船台上启动微机工作软件后, 根据不同的定位方式, 对 GPS 接收机的各种状态自动进行设定, 不断收集 GPS 接收机中的测量数据, 对来自基准台的差分数据, 可自动收集并更新数据。船台软件还可按计划进行导航。该系统在南海进行水深测图, 比单点定位精度提高约 10 倍。可以满足海上较大比例尺水下地形测量、海上工程勘察、海洋石油开采以及海洋矿藏开发等方面的需要。



1.2.4 我国 GPS 定位技术的应用和发展情况

新中国成立后,我国的航天科技事业在逐步建立和发展的基础上,已跻身于世界先进水平的行列,成为世界空间强国之一。从1970年4月把第一颗人造卫星送入轨道以来,我国已成功地发射了近百颗不同类型的人造卫星,为空间大地测量工作的开展创造了有利条件。

20世纪70年代后期,有关单位在从事多年理论研究的同时,引进并试制成功了各种人造卫星观测仪器。其中有人造卫星摄影仪、卫星激光测距仪和多普勒接收机。根据多年的观测实践,完成了全国天文大地网的整体平差,建立了1980年国家大地坐标系,进行了南海群岛的联测。

20世纪80年代初,我国一些院校和科研单位开始研究GPS技术。时至今日,我国的测绘工作者在GPS定位基础理论研究和应用开发方面做了大量工作:

(1)在大地测量方面,利用GPS技术开展国际联测,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。组织各部门参加1992年全国GPS定位大会战,在我国建成了平均边长约100km的GPS A级网,提供了亚米级精度地心坐标基准。此后,在A级网的基础上,我国又布设了边长为30~100km的B级网,全国约2500个点。A、B级GPS网点都联测了几何水准。这样,就为我国各部门的测绘工作,建立各级测量控制网,提供了高精度的平面和高程三维基准。我国已完成西沙、南沙群岛各岛屿与大陆的GPS联测,使海岛与全国大地网联结成一整体。

(2)在工程测量方面,应用GPS静态相对定位技术,布设精密工程控制网,用于城市和矿区油田地面沉降监测、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。加密测图控制点,应用GPS实时动态定位技术测绘各种比例尺地形图和用于工程建设中的施工放样。

(3)在航空摄影测量方面,我国测绘工作者也应用GPS技术进行了航测外业控制测量、航摄飞行导航、机载GPS航测等航测成图各个阶段的测量工作。

(4)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。我国已开始用GPS技术监测南极洲板块运动、青藏高原地壳运动、四川鲜水河地壳断裂运动,建立了中国地壳形变观测网、三峡库区形变观测网、首都圈GPS形变监测网等。GPS技术也用于海洋测量、水下地形测绘等方面。

(5)在静态定位和动态定位应用技术及定位误差方面,我国测绘工作者也作了深入的研究,研制开发了GPS静态定位和高动态、高精度定位软件以及精密定轨软件。在理论研究与应用开发的同时,培养和造就了一大批技术人才和产业队伍。

(6)此外,在军事国防、智能交通、邮电通信、地矿、煤矿、石油、建筑以及农业、气象、土地管理、环境监测、金融、公安等部门和行业,在航空航天、测时授时、物理探矿、姿态测定等领域,也都开展了GPS技术的研究和应用。

目前,我国已建成了北京、武汉、上海、西安、拉萨、乌鲁木齐等永久性的GPS跟踪站,对GPS卫星进行精密的定轨,为高精度的GPS定位测量提供观测数据和精密星历服务,以建立我国自主的广域差分GPS系统,参与全球导航卫星系统和GPS增强系统的筹建。同时,我国已初步建成了自己的卫星导航系统,能够生产导航型GPS接收机。