

工程 建设 新 技 术 丛 书

GPS

在建筑施工中的应用



张希黔
黄声享 编著
姚 刚

中国建筑工程工业出版社

工程建设新技术丛书

GPS 在建筑施工中的应用

张希黔 黄声享 姚 刚 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

GPS 在建筑施工中的应用 / 张希黔, 黄声享, 姚刚编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2003

(工程建设新技术丛书)

ISBN 7-112-05967-4

I. G... II. ①张... ②黄... ③姚... III. 全球定位系统 (GPS) - 应用 - 建筑工程 - 工程施工 IV. TU7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 071215 号

工程建设新技术丛书

GPS 在建筑施工中的应用

张希黔 黄声享 姚刚 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 7 $\frac{1}{8}$ 字数: 210 千字

2003 年 11 月第一版 2003 年 11 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 25.00 元

ISBN 7-112-05967-4

TU·5244 (11606)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书系统阐述了 GPS 在建筑工程施工中应用的基本理论、技术和方法，注重理论的实际应用，反映了 GPS 在土木工程中的最新研究成果。全书共分八章，内容包括：GPS 技术的最新发展及其在土木工程中应用现状与展望；GPS 卫星定位基础与定位的基本原理；GPS 在建筑施工中应用的技术设计、组织实施、作业方法、数据处理、成果质量与误差分析；结合大型建筑工程施工实例，详细介绍了测量基准传递、日照变形观测和动态特性测定等 GPS 技术应用成果等。

本书可作为土木与建筑工程勘察设计、施工、安全运营与管理等方面的工程技术人员参考，也可供高等学校土木工程等相关专业作为教材使用。

* * *

责任编辑 郦锁林

责任设计：孙 梅

责任校对：王金珠

前 言

以 GPS 为代表的空间定位技术已在许多行业领域得到推广应用,在高精度定位与导航方面体现出传统方法不可比拟的优越性。在土木工程领域,比如,大坝、桥梁、公路等工程的勘测设计、施工和安全运营管理方面, GPS 也得到了很好的应用,并已逐步替代常规测量技术。

1999 年底,中建三局与武汉大学测绘学院(原武汉测绘科技大学)合作,对国家建设部新技术应用示范工程“厦门建设银行大厦”的建筑施工,首次应用 GPS 进行测量定位基准传递、日照变形观测、工程结构自振特性测定等试验研究工作,取得了非常令人鼓舞的成果。2001 年初,经中建总公司组织的专家鉴定,该项技术达到国际先进水平,经技术查新,在国际和国内均属首创,并且在工程的玻璃幕墙安装过程中,创造了显著的直接经济效益。结果表明, GPS 在建筑施工中具有重要的应用推广价值,目前已引起建筑行业的极大兴趣和关注,是一项改造和提升传统建筑施工水平的高新技术。

鉴于此,为了推动 GPS 在建筑施工中的应用,我们及时组织相关技术人员对已有研究成果进行全面系统的总结,形成了本书的写作纲要,于 2003 年 4 月完稿。本书共分八章:

第一章,作为概述,介绍 GPS 的特点、系统组成及其最新发展,并对 GPS 在土木工程中的应用现状和未来进行论述;

第二章和第三章,分别论述 GPS 卫星定位基础及其基本原理;

第四章、第五章和第六章,重点结合建筑施工的特点,详细论述 GPS 应用的技术设计、组织实施、作业方法、数据处理、成

果质量及其误差分析等问题；

第七章和第八章，是建筑工程实际应用问题。着重结合“厦门建设银行大厦”的工程施工，对 GPS 定位控制方案、基准传递技术的实际结果及其日照变形监测等问题进行介绍，并结合超高层建筑、大型桥梁、大坝等几个典型工程的 GPS 动态监测试验，介绍 GPS 应用所取得的成果。

本书可作为土木与建筑工程勘察设计、施工、安全运营与管理等方面的工程技术人员参考，同时也适合于高等学校土木工程专业作为教材使用。

本书应该说是集体智慧的结晶。在此，向曾经参与和支持过项目工作的中建三局科技部、中建三局三公司厦门分公司、武汉大学测绘学院、中建总公司科技开发部等有关领导和工程技术人员深表感谢。本书的出版得到了中国建筑工业出版社的大力支持，在此深表谢意。

限于我们的水平，书中不当之处恳请读者批评指正。

作者

2003 年 4 月

目 录

前 言

第 1 章 概述	1
1.1 GPS 卫星定位技术的发展及特点	1
1.1.1 GPS 的发展历程	1
1.1.2 GPS 技术的特点	8
1.2 GPS 系统的组成	9
1.2.1 空间部分	10
1.2.2 地面监控部分	10
1.2.3 用户部分	12
1.3 GPS 在土木工程中的应用现状与展望	14
1.3.1 GPS 技术的应用前景	14
1.3.2 GPS 技术在我国土木工程领域的应用现状	16
1.3.3 GPS 技术在土木工程领域的应用展望	19
第 2 章 GPS 卫星定位基础	21
2.1 时间系统和坐标系统	21
2.1.1 时间系统	21
2.1.2 坐标系统	26
2.2 卫星轨道运动	37
2.2.1 近地卫星的轨道运动	37
2.2.2 GPS 卫星的运动	44
2.2.3 GPS 卫星星历	48
2.3 GPS 卫星信号	50
2.3.1 GPS 的信号结构	50
2.3.2 GPS 卫星位置的计算	56

2.4 美国政府的 GPS 政策	60
2.4.1 SA 和 AS 政策	60
2.4.2 针对 SA 和 AS 政策的对策	61
第 3 章 GPS 定位基本原理	63
3.1 GPS 观测量	64
3.1.1 码相位观测量 (伪距测量)	64
3.1.2 载波相位测量	66
3.2 载波相位观测量的线性组合	68
3.3 GPS 定位方法	70
3.3.1 绝对定位与相对定位	70
3.3.2 差分 GPS 定位	74
第 4 章 建筑施工 GPS 定位的技术设计与实施	78
4.1 技术设计	78
4.1.1 建筑施工定位的特点及基本要求	78
4.1.2 建筑施工 GPS 定位前的准备工作	82
4.1.3 建筑施工 GPS 定位的技术设计	87
4.2 组织与实施	97
4.2.1 外业准备	97
4.2.2 技术设计书的编写	100
4.2.3 外业实施	101
4.3 作业模式	108
4.3.1 静态定位模式	108
4.3.2 动态定位模式	109
4.3.3 实时动态定位模式	110
第 5 章 建筑施工 GPS 定位的数据处理	112
5.1 数据预处理及其质量分析	112
5.1.1 数据预处理	112
5.1.2 观测成果检核	115
5.1.3 观测质量的评价标准	117
5.1.4 关于重测问题	118

5.2 GPS 基线解算模型与精度	118
5.2.1 双差观测值模型	118
5.2.2 法方程式及其解算	121
5.2.3 精度评定	122
5.3 GPS 网平差与坐标转换	124
5.3.1 GPS 网的三维无约束平差	125
5.3.2 GPS 网的约束平差	127
5.3.3 GPS 基线向量网与地面网的联合平差	132
5.3.4 GPS 定位成果的坐标转换	133
5.4 GPS 高程	139
5.4.1 GPS 水准高程	140
5.4.2 GPS 重力高程	145
第 6 章 建筑施工 GPS 定位的误差分析	147
6.1 概述	147
6.2 与卫星有关的误差	148
6.2.1 卫星星历误差分析	148
6.2.2 卫星钟误差分析	151
6.2.3 相对论效应影响分析	151
6.3 信号传播误差	153
6.3.1 电离层折射误差分析	154
6.3.2 对流层折射误差分析	157
6.3.3 多路径效应影响分析	159
6.4 接收设备误差	162
6.4.1 接收机钟误差分析	163
6.4.2 接收机位置误差分析	163
6.4.3 天线相位中心位置误差分析	164
第 7 章 建筑施工 GPS 定位控制应用实例	165
7.1 厦门建设银行大厦工程概况	165
7.1.1 建筑、结构概况	165
7.1.2 施工测量概况	166

7.2 GPS 定位控制方案设计	168
7.2.1 概述	168
7.2.2 准备工作	171
7.2.3 GPS 定位基准传递技术	174
7.3 GPS 定位基准传递的实践与结果	178
7.3.1 首次 GPS 定位成果报告	178
7.3.2 第二次 GPS 定位成果报告	183
7.3.3 第三次 GPS 定位成果报告	188
7.3.4 第四次 GPS 定位成果报告	193
7.3.5 GPS 基准传递结果的总体分析与评价	198
7.4 GPS 日照变形监测	202
7.4.1 GPS 日照变形监测方案	202
7.4.2 GPS 日照变形监测结果及分析	203
第 8 章 大型工程的 GPS 动态监测实例	206
8.1 引言	206
8.2 超高层建筑的 GPS 动态监测试验	208
8.2.1 超高层建筑的 GPS 动态监测试验方案	208
8.2.2 超高层建筑的 GPS 动态监测试验结果及分析	209
8.3 大型桥梁工程的 GPS 动态监测试验	212
8.3.1 大型桥梁工程的 GPS 动态监测试验方案	213
8.3.2 大型桥梁工程的 GPS 动态监测试验结果及分析	214
8.4 隔河岩大坝 GPS 自动化监测系统	219
8.4.1 概述	219
8.4.2 设计思想	221
8.4.3 详细设计	225
8.4.4 实际应用	232
主要参考文献	238
丛书简介	241

第 1 章 概 述

1.1 GPS 卫星定位技术的发展及特点

1.1.1 GPS 的发展历程

自 1957 年 10 月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的重大突破。人造地球卫星技术在军事、通讯、气象、资源勘察、导航、遥感、大地测量、地球动力学以及天文的众多领域得到了极其广泛的运用。目前, GPS 技术在建筑勘察、设计、施工、运营管理等方面的应用已开始起步,可以预见,随着 GPS 技术基础理论及其设备的进一步完善和发展,其广泛应用于建筑业这一传统产业将为期不远。

(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观测目标,由地面人卫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观测目标,在很大程度上解决了常规定位方法难以实现的远距离目标联测问题,在当时(20 世纪 60 年代至 70 年代)该技术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在英国和德国测绘部门的协助下,采用人卫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 $\pm 4.1\text{m}$ 。

由于卫星三角测量的局限性，所以，后来就很快致力于把卫星作为空间动态已知点的研究，发展了卫星多普勒定位。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（NNSS: Navy Navigation Satellite），又称子午卫星导航系统。该系统是采用多普勒测量来定轨和定位的。系统的卫星星座一般由 6 颗卫星组成，其平均轨道高度约为 1070km，从测点上接受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西北等地布设了数千个多普勒点，为国民经济建设发挥过重要作用。

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，进行测量的真正工作时间一般不足 20%；不是一个连续的导航定位系统，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较大局限，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它的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“卫星测时测距导航/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、定时的功能，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（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）为制定方案和方案论证，包括制定规划、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，生产实验阶段发射了多颗 BLOCK II 型、BLOCK II A 型和第三代 BLOCK II R 型卫星，GPS 卫星系统由此而建成。

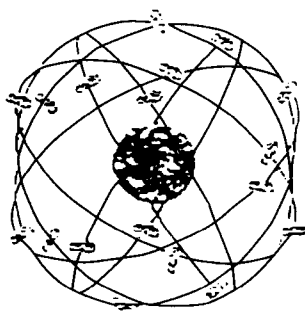


图 1-1 GPS 卫星星座

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 $21 + 3$ ；卫星轨道面个数 6；卫星高度 20200km；卫星轨道倾角 55° ；卫星运行周期为 11h58min（恒星时为 12h）；载波频率为 $L_1 = 1575.42\text{MHz}$ （波长约 19cm）和 $L_2 = 1227.60\text{MHz}$ （波长约 24cm）。当截止高度角取 15° 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 颗卫星，当截止高度角取 10° 时，最多能同时观测到 10 颗 GPS 卫星；当截止高度角取 5° 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 II R 卫星组成的，在一般情况下，用户能同时观测到 7 ~ 8 颗卫星。

图 1-2 为 GPS 工作卫星的外部形态。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, 维护正常工作。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 根螺旋型天线组成的阵列天线发射张角大约为 30° 的电磁波束, 覆盖卫星的可见地面。卫星姿态调整采用三轴稳定方式, 由四个斜装惯性轮和喷气控制装置构成三轴稳定系统, 致使螺旋天线阵列所辐射的波束对准卫星可见地面。

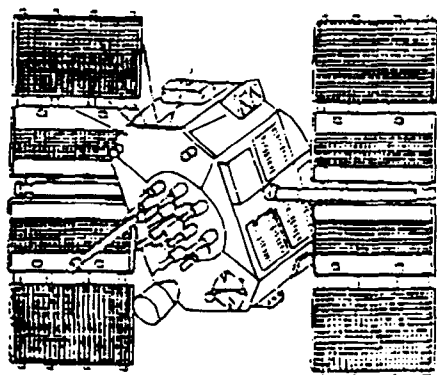


图 1-2 GPS 卫星外形图

(3) 其他卫星定位系统

1) GLONASS 全球导航卫星系统

GLONASS (GLObal navy NAVigation Satellite System) 全球导航卫星系统的起步比 GPS 要晚 9 年, 是前苏联 (后由俄罗斯接管) 于 20 世纪 80 年代开始建立的。1982 年 10 月 12 日发射了第一颗 GLONASS 卫星, 历经 13 年的努力, 于 1996 年完成整个系统的建设。GLONASS 系统与 GPS 非常相似, 它由空间卫星星座、地面控制和用户设备三大部分组成。系统的基本参数为: 卫星颗数 $21+3$; 有三个等间隔椭圆轨道, 轨道面间的夹角为 120° ; 轨道倾角 64.8° ; 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 19100km；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 1602 ~ 1616MHz， L_2 为 1246 ~ 1256MHz。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。

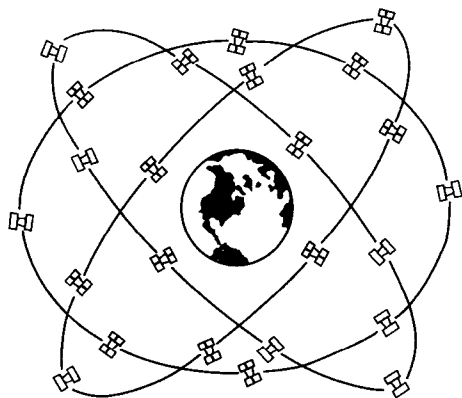


图 1 - 3 GLONASS 卫星星座

2) Galileo (伽利略) 系统

卫星导航定位技术的发展使国际社会公认，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，它必须是可以放心使用、安全可靠的国际管理运行的纯民用系统。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 GPS 一统天下的局面，欧盟决定启动 Galileo (伽利略) 计划，建立自主的民用全球卫星定位系统。

Galileo 系统的发展计划为：1999 年 7 月 ~ 2000 年 12 月为定义阶段；2000 ~ 2002 年为系统技术研究；2001 ~ 2003 年为系统设计及开发；2003 ~ 2006 年为在轨测试及验证；2006 ~ 2008 年为系统部署、运行。整个系统将于 2008 年建成，投入使用。欧盟把

Galileo 计划作为其第一大项目，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 系统的星座结构由 30 颗中轨道卫星组成，预计在 2003 年开始发射卫星入轨。该系统预定精度远高于 GPS 的民用精度，预定的导航精度 $5 \sim 10\text{m}$ 。选择的工作频率仍为 L 频段，以使用户设备与 GPS 或 GLONASS 兼容。Galileo 星座建成后将可以弥补目前 GPS 星座在全球全时可用性上的不足。对于安全要求高的应用，可采用 Galileo/GPS 双系统组合，从而提高安全可靠。目前 Galileo 系统的建设，已获财政支持，正在快速推进，这对美国 GPS 是一种抗衡力量，而对全球民间用户则是一件大好事。

3) 中国北斗一号双星导航定位系统

GPS 和 GLONASS 全球卫星定位系统采用的是被动式定位，而由我国建立的“北斗一号”双星导航定位系统采用的是主动式定位。该系统空间部分由两颗卫星组成。

2000 年 10 月 31 日 0 时 2 分在西昌卫星发射中心用“长征三号甲”运载火箭将我国自行研制的第一颗“北斗导航试验卫星”送入预定轨道，12 月 21 日发射升空了我国第二颗“北斗导航试验卫星”，使构成的“北斗导航系统”标志着我国拥有了自主研发的第一代卫星导航定位系统。这两颗卫星位于赤道上空 36000km ，分别在东经 80° 和 140° ，是地球同步轨道大功率长寿命导航定位卫星。由于系统采用的是主动式定位，如图 1-4 所示，所以整个用户接收机都要有收发两个天线，上行是 L 波段，下行是 S 波段。用户定位需要先发射一个请求定位信号，通过 SV1、SV2 卫星转发给地面中心站，经过这样的收发，中心站即可得到每颗卫星到用户接收机的距离 D_1 、 D_2 。若用户接收机的高程已知，即可求得用户的二维平面坐标。中心站计算出用户位置通过卫星转发给用户。

双星定位系统是一个二维定位系统，其定位精度决定于高程精度。服务范围包括我国大陆及东南海域，属区域性系统，将来

可以发展成为准全球性系统（用 6 颗卫星）。北斗一号系统的投资较少，适合我国当前经济能力和各有关方面的需求，在需要导航定位与移动数据通信相结合的场合更是有的放矢。北斗导航定位系统比 GPS、GLONASS 多了一个数据通信的功能，所以它的用途要宽广很多。

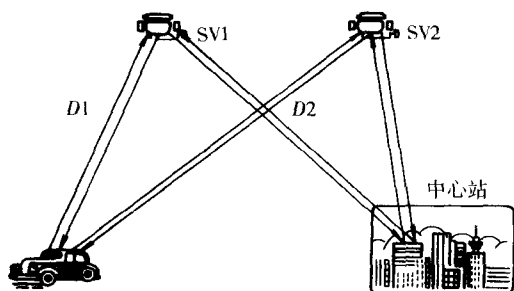


图 1-4 北斗双星定位系统

(4) 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有更精确更安全的使用。

GPS 现代化计划的进程如下：

1) GPS 现代化第一阶段，发射 12 颗改进型的 GPS BLOCK II R 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，在这两个频率上换试验性的同时加载新的军码 (M 码)；GPS BLOCK II R 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) GPS 现代化第二阶段，发射 6 颗 GPS BLOCK II F 型卫星。GPS BLOCK II F 型卫星除了有 GPS BLOCK II R 型卫星的功能外，更进一步强化发射 M 码的功率和增加发射 L_5 频率。GPS II F 型卫