

GPS 测量原理及在水电工程中的应用

徐绍拴

(武汉大学测绘学院 武汉 430079)

摘要:本文简要地介绍了 GPS 定位原理,结合我国水电工程的实际,论述了 GPS 在水电工程中应用,并对今后的应用提出了建议。

关键词:全球定位系统(GPS) 定位方程 定位方法 水电工程

Title:Measurement principle of GPS and its application in hydropower projects // by Xu Shaoquan // School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University

Abstract:This paper introduced the positioning principle of GPS. In combination with the practice in Chinese hydropower projects, it described the application of GPS in hydropower projects, also gave some suggestions.

Keywords: GPS, positioning equation, positioning method, hydropower project

中图分类号:P228.4 文献标识码:B 文章编号:1671-1092(2003)01-0010-04

1 引言

GPS 是英文“Navigation Satellite Timing And Ranging/Global Positioning System”的缩写词 NAVSTAR/GPS 的简称。其含意是,利用导航卫星进行测时、测距,以构成全球定位系统。通常简称为“全球定位系统”。

GPS 系统由美国陆、海、空三军联合于 60 年代末提出,于 1994 年建成,经方案研究、方案论证、系统设计、初步试验、系统全面研制、试验、实用组网等阶段,历时二十年,耗资 200 亿美元,是美国继阿波罗登月计划和航天飞机之后的第三项庞大的空间计划。该系统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、航天)、全球性、全天候、连续性和实时性的导航、定位和定时的功能,能为各类用户提供精密的三维坐标、速度和时间。

GPS 系统由 GPS 卫星(设计卫星数为 24+1,目前在轨工作卫星有 28 颗)、地面控制和 GPS 接收机三大部分组成。我国从 70 年代开始研究 GPS 技术,自 80 年代末引进 GPS 接收机(导航型和测地型)以来,已成功地应用于大地测量和工程测量、运载工具导航和管制(陆地、海洋)、地壳运动监测、工程变形监测、资源勘察与调查、气象、精细农业、地球动力学等众多领域,极大地推进科技发展和生产效率的提高。

俄罗斯(前苏联)也于 1982 年开始发展自己的全球导航定位系统,简称 GLONASS 系统。目前欧洲正筹建类似于 GPS 和 GLONASS 的 GALILEO(伽俐略)系统,预计 2005 年开始运行。我国也已于 2000 年开始发

展北斗导航系统。

2 GPS 定位基本原理

2.1 GPS 观测量

GPS 卫星信号含有多种定位信息,作为定位的观测量,主要有两种:即码相位观测量和载波相位观测量。所谓码相位观测,就是 GPS 卫星发射的信号到达接收机的时间,是通过 GPS 卫星发射的测距码信号(C/A 码或 P 码)与接收机自身产生的测距码信号,经相关技术处理,求定时间延迟量,来完成卫星至接收机之间的几何距离测定。所谓载波相位观测,就是卫星到接收机之间的几何距离测定,是通过求定接收机产生的基准信号的相位与接收到卫星的载波信号的相位之差来实现的。由于载波的波长比码元的宽度短得多,所以测量精度比用码相位要高。目前大地型 GPS 接收机都采用载波相位测量。

2.2 GPS 观测方程和定位方程(仅列出载波相位观测方程和定位方程)

载波相位观测方程:

$$\varphi = f/c(\rho - \delta\rho_1 - \delta\rho_r) - fV_1^1 + fV_1^2 - N \quad (1)$$

式中, φ 为载波相位观测量; c 为真空中的光速; f 为载波频率; ρ 为卫星至接收机的距离; $\delta\rho_1$ 为卫星信号通过电离层产生折射的改正;即 $\delta\rho_r$ 为卫星信号通过对流层产生折射的改正; V_1^1 为接收机钟的改正; V_1^2 为卫星钟的改正; N 为整周未知数。

载波相位定位方程:

设卫星坐标为 X_s, Y_s, Z_s (可根据卫星信号计算出, 为已知值), 接收机(即测站)坐标为 X, Y, Z (待求值), 则:

$$\rho = [(X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2]^{1/2} \quad (2)$$

设接收机(即测站)近似坐标为 X_0, Y_0, Z_0 , 其改正数为 V_x, V_y, V_z , 即有:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + V_x \\ Y &= Y_0 + V_y \\ Z &= Z_0 + V_z \end{aligned} \quad (3)$$

设卫星信号从卫星至接收机传播时间为 Δt , 将(2)、(3)式代入(1)式, 并将 ρ 在 (X_0, Y_0, Z_0) 上用泰勒级数展开, 经线性化后得:

$$\begin{aligned} -f/c \cdot (X_0 - X_s) / \rho_0 \cdot V_x - f/c \cdot (Y_0 - Y_s) / \rho_0 \cdot V_y - f/c \cdot (Z_0 - Z_s) / \rho_0 \cdot V_z - \Delta t + f \cdot V_t + N = f/c \cdot (\rho_0 \cdot t + \rho \cdot V_t - \rho \cdot \Delta t - \delta \rho_1 - \delta \rho_r) - \varphi \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式中 V_x, V_y, V_z, V_t 为未知数(因卫星上装有高精度的铯钟, 故 V_t 可求出, 而接收机上不可能安装铯钟, 故将 V_t 作为未知数来求解), 当观测 4 颗卫星的信号, 即可求解出这四个未知数, 从而可求出测站点的三维坐标, 完成定位。这就是 GPS 观测时, 观测的卫星数 ≥ 4 的原因。

2.3 定位方法

(1) 绝对定位(单点定位)

独立确定待定点在地球协议坐标系中的绝对位置的方法, 称为绝对定位或称单点定位。GPS 采用 WGS-84 坐标系, 所以单点定位求出的结果属该坐标系的坐标, 但可通过坐标转换获得所需坐标系统的坐标。

优点: 一台 GPS 接收机即可作业, 点位三维坐标实时显示, 数据处理简单。

缺点: 定位精度低, 无 SA 为 $\pm 10 \sim 30$ m, 有 SA 为 ± 100 m。

应用范围: 船舶导航; 地质矿产勘探; 暗礁、浮标定位; 海洋捕鱼; 旅游、越野导航定位; 低精度测量等。

(2) 相对定位

确定同步跟踪相同 GPS 卫星信号的若干台(至少为 2 台)GPS 接收机之间的相对位置的方法, 称为相对定位。相对定位按作业方法不同, 又可分为静态相对定位、快速静态相对定位、动态相对定位和差分相对定位等几种。

优点: 由于采用同步观测资料进行相对定位, 使卫星钟误差、星历误差、信号在大气中传播误差可得到消除或大幅度削弱。所以, 可获得较高的定位精度。目前相对定位精度可达到 10^{-9} 。

缺点: 因几台 GPS 接收机同时作业, 组织、实施、数据处理较复杂。由于求出的是同步点站间的三维基线向量(即点间的边长), 故必须给出一个点的已知坐

标和一个已知方位角。

应用范围: 大地测量、工程测量、变形监测、地壳运动监测等精密定位测量工作。

① 静态相对定位

静态相对定位测量法, 就是把多于 3 台 GPS 接收机同时安置在观测点上同步观测一定时段, 一般为 1~2 h 不等, 用边连接方法构网, 用后处理软件解算基线, 经平差计算求得观测点三维坐标。

一般 GPS 控制网, 都应采用静态相对定位测量方法。这种方法定位精度高, 适用长边, 测边相对精度可达 10^{-9} 。

② 快速静态相对定位测量法

这种方法尤其适用于变形监测。其工作原理是: 把两台 GPS 接收机安置在两个已知坐标的测站点上固定不动(称为基准站)连续观测, 另 1~4 台 GPS 接收机在其他测站点上移动观测(称为流动站), 每次观测 5~10 min, 经事后处理, 解算出各流动站点的三维坐标。

测量精度: 水平方向精度为 $\pm 3 \sim 5$ mm, 垂直方向精度为 $\pm 5 \sim 8$ mm。若基准站与流动站距离大于 3 km, 水平精度为 $5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \cdot D$, 垂直精度为 $8 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \cdot D$, D 为被测距离, 以 km 计。

③ 动态相对定位测量法

(a) 准动态相对定位测量法

把一台 GPS 接收机安置在一个基准站点上, 另一台 GPS 接收机先在另一基准站点上观测 5 min, 在保持对所测卫星连续跟踪而不失锁的情况下, 在各流动测站点上停留 2~10 min。经事后处理解算出各流动站点的三维坐标, 精度可达 1~2 cm。

(b) 实时动态相对定位测量方法

实时动态测量方法又叫 RTK 方法 (Real Time Kinematic), 其原理是: 在基准站上安置一台 GPS 接收机, 对所有可见 GPS 卫星进行连续观测, 并将观测数据通过无线电传输设备, 实时地发送给在各流动测站点上移动观测(1~3 s)的 GPS 接收机, 移动 GPS 接收机在接收 GPS 信号同时, 通过无线电接收设备接收基准站传输的观测数据, 再根据差分定位原理, 实时计算出测站点三维坐标及精度, 精度一般可达 2~5 cm。如果距离近, 且有 5 颗以上共视 GPS 卫星, 精度可达 1~2 cm。

④ 差分定位

所谓差分定位, 就是将一台 GPS 接收机, 安置在已知坐标的测站上(称基准站)进行观测, 根据基准站已知精密坐标, 计算出基准站到卫星的有关改正数(距离、位置或载波相位), 并由基准站实时地将这一改正

数发送出去。用户接收机在进行 GPS 观测的同时,也接收到基准站的改正数,并对其定位结果进行改正,从而提高定位精度。RTK 方法,就是一种单站差分定位方法。差分定位按发送信息的方式不同,可分距离差分、位置差分和载波相差分三种。为解决单站差分受基准站至用户距离的限制,发展成局域差分(LADGPS)和广域差分(WADGPS)。目前,这一技术又进一步发展成多基准站 PTK 技术,又称网络 RTK 技术。多基准站 RTK 技术,是利用大区域、多基准站、多观测资料的优势,将多个基准站的观测资料有机组合,消除电离层、轨道等误差,在用户附近建立一个虚拟参考站,满足用户差分的需要。实践表明,即使用户离基准站 100 km,用单台 GPS 接收机,仍可获得厘米级快速定位精度,但应采用双差分定位,数据处理也比普通差分定位要复杂。

3 GPS 在水电工程中的应用

3.1 在水电工程规划、设计中的应用

应用 GPS 静态相对定位方法, 布设测图控制网, 直至加密(采用快速静态相对定位方法)到测图的测站点, 再用 RTK 法测绘不同比例尺的地形图, 供规划、设计使用。

3.2 在水电工程施工中的应用

应用 GPS 静态相对定位方法, 布设工程施工测量控制网, 并用 RTK 法, 进行施工放样和工程土方验收。

3.3 在水电工程运行中的应用

(1) 将 GPS 与 GSM 集成, 采用单点定位作业方法。建立巡堤(水库、库岸)查险报警系统。

(2) 将 GPS 与 GSM 集成, 建立库区防汛、车、船指挥调度系统。

(3) 布设库区变形监测 GPS 控制网, 可代替常规的边角网。

表 1 和表 2 为某水库变形监测网的实测结果比较。该网共有 5 个点, 先用 ME5000 测边, 再用 T₃ 经纬

仪测角, 然后用 GPS 静态相对定位法观测(GPS 解算用 IGS 星历和 GAMIT 软件)。

表 1 边长比较表

Table1: Comparison of different sides

边名	S _{GPS} (mm)	S _{ME5000} (mm)	ΔS(mm)
2-3	466 244.1	466 244.3	-0.2
2-4	652 860.9	652 861.4	-0.5
4-5	642 664.7	642 664.3	+0.4
2-5	748 678.5	748 678.8	-0.3
1-5	1 313 474.2	1 313 474.5	-0.3
1-4	1 178 112.5	1 178 112.4	+0.1
3-5	359 343.8	359 344.0	-0.2
1-2	582 651.0	582 650.7	+0.3
3-4	359 894.2	259 893.7	+0.5

从表 1 和表 2 结果可看出, GPS 方法求出的过长与 ME5000 测边精度相当, 点位坐标与常规边角网法精度一致, 即 GPS 完全可以代替常规方法。

(4) 采用 GPS 快速静态相对定位方法进行库区滑坡监测。

2000 年对某水库区滑坡进行 GPS 快速静态相对定位试验。该水库区滑坡分 8 块, 布设 8 个基准点(LY01-08, 其中 LY01 为起算点, 坐标经与拉萨、西安、南宁 GPS 跟踪站联测求出), 54 个监测点。

基准网点观测采用 8 台双频 GPS 接收机, 用静态相对定位方法, 同步观测 5 h(因平均边长仅 3 km), 采样间隔 10 s, 截止高度角 10°。基准网数据处理时用 IGS 星历和 Bernese 软件, 用 PowerADJ 平差计算, 最弱点精度(相对 LY01 点)为 m_p=±1.0 mm, m_{it}=±1.7 mm。

监测点观测采用 GPS 快速静态相对定位方法, 对每一滑坡体观测时, 2 台 GPS 接收机安置在就近基准点上(最长的距离少于 3 km), 其他 GPS 接收机在监测点上同步观测 10 min, 采样间隔 2 s, 截止高度角 10°。数

表 2 点位坐标比较表

Table2: Comparison of different point Coordinates

(单位: m)

点号	GPS 法		边角网法		差值(mm)	
	x	y	x	y	dx	dy
4	1 417.275 0	812.938 8	1 417.274 7	812.938 8	+0.3	0.0
3	1 092.895 4	968.828 9	1 092.895 7	968.828 9	-0.3	0.0
2	1 189.804 9	1 424.890 4	1 189.804 4	1 424.898	+0.5	-0.4
1	1 337.996 4	1 988.380 8	1 337.996 7	1 988.380 7	-0.3	+0.1
5	774.706 4	801.823 2	774.706 6	801.822 9	-0.2	+0.3

据处理用快速静态相对定位软件。各滑坡体监测精度统计见表 3。

从表 3 可看出 8 个滑坡体监测平面位置平均精度为 ± 2.6 mm, 高程精度为 ± 3.96 mm。

表 3 变形监测精度统计表 (单位: mm)
Table 3: Statistics of deformation monitoring accuracy

滑坡名	M_N	M_E	$M_{\sqrt{N^2+E^2}}$	M_H	$M_{\text{精度}}$
××滑坡	2.4	2.7	3.6	4.8	5.5
××滑坡	2.8	1.4	3.2	2.8	4.2
××滑坡	2.5	1.6	3.0	4.9	5.5
××滑坡	0.8	0.4	0.9	3.8	3.9
××滑坡	2.3	2.1	3.1	3.2	4.4
××滑坡	1.5	0.9	1.7	4.7	5.0
××滑坡	1.8	2.2	2.9	4.3	5.2
××滑坡	1.5	1.1	1.8	3.2	3.7
平均值	1.95	1.55	2.6	3.96	4.68

(5) 采用 GPS 自动化监测系统进行大坝外观变形监测湖北省清江隔河岩水库大坝外观变形 GPS 自动化监测系统, 已于 1998 年建成并投入运行。实现一年 365 天、每天 24 小时连续实时监测, 同时提供三维变形量。实测资料表明, GPS 自动化监测系统, 用 6 h 观测数据求解 (采用专用的高精度自动化解算软件, 其平面和垂直位移精度优于 ± 1.0 mm; 1~2 h 观测数据求解 (采用专用的的高精度自动化解算软件), 精度优于 ± 1.5 mm。位于隔河岩大坝下游高坝洲水电站, 也于 2002 年建立了移动式大坝外观变形 GPS 监测系统, 精度同隔河岩水库大坝外观变形 GPS 自动化监测系统。

(6) GPS 与测深仪配合进行水库面积、贮水量及库区水下地形测量

4 结论与建议

(1) 由于 GPS 有定位精度高、观测时间短、作业不受天气影响、测站间无需通视、同时测定三维坐标、操作简单等优点, 经我国测绘领域十多年的实践表明, GPS 技术完全可代替常规的测量方法, 其优越性和效益已越来越显著。

(2) 建议在水电工程各阶段, 全面使用 GPS 技术, 以促进水电施工、管理的技术进步, 提高生产效率。若布设各等级 GPS 控制网, 可采用静态相对定位法, 用随机软件解算基线, 用 powerADJ 平差; 若布设库区变形监测网, 应用 GAMIT 或 Berness 软件, IGS 星历解算基线, 用 PowerADJ 平差; 若建立大坝外观变形 GPS 自动化监测系统, 应采用专用的高精度自动化解算软件解算; 若进行滑坡、高边坡变形监测, 可采用快速静态相对定位法; 若进行图根点、测站点加密、测图、施工放样、土方验收等, 可采用 RTK 法。

(3) 尽管 GPS 有很多优势, 在我国测绘局系统已全面应用, 而在其它领域应用还有一个过程, 但随着全球定位系统的多元化, GPS 本身的不断完善, 接收机价格不断下降, 体积越来越小, 测量精度不断提高, 使用越傻瓜化, GPS 技术必然会在水电工程中广泛应用。■

参考文献

- [1] 徐绍铨等. 长江三峡库区崩滑地质灾害 GPS 监测研究报告
- [2] 北京, 国土资源部长江三峡地质灾害防治指挥部, 1999.8
- [3] 徐绍铨, 李征航等. 隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统的建立. 武汉测绘科技大学学报, 1998 年 9 月, 23 卷增刊
- [4] Hudnut K.W., J.A.Behr. Continuous GPS Monitoring of Structural Deformation at Pacoima Dam. California Seismological Research Letters. 69, No.4 1998, PP299-308

收稿日期: 2002-09-12

作者简介: 徐绍铨 (1939-), 男, 浙江仙居人, 武汉大学测绘学院教授, 博士生导师, 主要从事大地测量学、GPS 测量原理及应用等领域的教学和科学研究工作。

国家电力监管委员会宣告成立

为了对电力企业进行有效的监管, 国务院决定成立国家电力监管委员会, 按照垂直管理体系, 向区域电网公司电力交易调度中心派驻代表机构。监管委员会的主要职责是制订市场运营规则, 监管市场运行, 维护公平竞争; 向政府价格主管部门提出调整电价建议; 监督电力企业生产标准, 颁发和管理电力业务许可证; 处理电力纠纷; 负责监督社会普遍服务政策的实施。目前, 电监会的“三定”(定职、定编、定人) 方案已上报国务院审批。这是中国首次在垄断行业改革中设立监管机构, 具有开创性的意义。

柴松岳为国家电力监管委员会主席, 邵秉仁、宋密(女)、史玉波为国家电力监管委员会副主席。