

# GNSS 技术原理及其在水利工程中的具体应用

——以镇子梁水库为例

谢英

山西省朔州市镇子梁水库管理中心

DOI:10.32629/etd.v6i5.16887

**[摘要]** 水利工程是国家基础设施建设的重点,在防洪、发电、灌溉和供水等方面都有着不可替代的作用。随着卫星导航定位技术不断进步,全球导航卫星系统(GNSS)凭借高精度、全天可用、覆盖全球、自动化程度高这些优势,在测绘领域越来越重要。全球气候变化导致洪水等极端天气越来越多,水利工程面临的安全风险也在增加。这就需要对大坝、堤防这些关键设施进行实时监测和预警。GNSS技术能实现毫米级甚至更小单位的精准定位,可以为水利工程安全监测提供可靠的数据,所以研究GNSS技术在水利工程测量中的应用,十分紧迫且必要。

**[关键词]** GNSS技术；水利工程；大坝变形；水文测量；应用

中图分类号：TV5 文献标识码：A

The principle of GNSS technology and its specific applications in dam deformation monitoring and hydrological monitoring Take the Ziliang Reservoir in Shuzhou City as an example

Ying Xie

The Management Center of Ziliang Reservoir, Shuzhou City, Shanxi Province

**[Abstract]** Water conservancy projects are a key focus of national infrastructure construction and play an irreplaceable role in flood control, power generation, irrigation and water supply. With the continuous advancement of satellite navigation and positioning technology, the Global Navigation Satellite System (GNSS) is becoming increasingly important in the field of surveying and mapping due to its advantages such as high precision, all-weather availability, global coverage, and high degree of automation. As global climate change leads to an increasing number of extreme weather conditions such as floods, the safety risks faced by water conservancy projects are also on the rise. This requires real-time monitoring and early warning of key facilities such as DAMS and embankments. GNSS technology can achieve precise positioning at the millimeter level or even smaller units, providing reliable data for the safety monitoring of water conservancy projects. Therefore, it is extremely urgent and necessary to study the application of GNSS technology in water conservancy project surveying.

**[Key words]** GNSS Technology Water conservancy projects; Deformation of the dam; Hydrological measurement "Application

## 前言

本文聚焦全球导航卫星系统(GNSS)技术在水利工程监测中的应用。通过分析GNSS的技术原理,包括卫星信号的传输方式、伪距测量和载波相位测量等核心方法,以及实时动态差分(RTK)、精密单点定位(PPP)等定位技术。GNSS具有测量精度高、全天候作业、自动化程度高这三大优点。我们搭建了基于GNSS的自动化监测系统,用来随时监测大坝、堤防等设施有没有位

移。不过,在水域复杂的地方或者山区,GNSS信号容易被遮挡,还会出现多路径效应。针对这些问题,要提出融合多种技术的信号处理方案,它为水利工程的智能化建设和安全运行提供了关键的技术支持,对水利行业的技术升级和高质量发展起到了很大的推动作用。

## 1 GNSS技术原理

### 1.1 GNSS系统组成

GNSS并非单一系统,而是全球卫星导航系统的统称,当前主要由美国的GPS、中国的北斗(BDS)、俄罗斯的GLONASS和欧盟的Galileo四大全球卫星导航系统构成,同时还包括日本的准天顶卫星系统(QZSS)和印度的区域导航卫星系统(IRNSS)等区域系统。这些系统共同构成了一个庞大而复杂的空间定位网络。

(1) 空间端。各系统卫星数量与轨道布局各有特点。GPS系统由24颗卫星组成,均匀分布在6个轨道平面上,轨道高度约20200千米,能够确保全球任意地点、任意时刻至少可见4颗卫星,从而实现三维定位。北斗系统则独具特色,采用“混合星座”设计,包含地球静止轨道(GEO)、倾斜地球同步轨道(IGSO)和中圆地球轨道(MEO)卫星,其中3颗GEO卫星可增强亚太地区的信号覆盖与服务性能;GLONASS系统卫星分布在3个轨道平面,轨道高度约19100km;Galileo系统规划由30颗卫星组成,旨在提供高精度民用服务,其卫星轨道高度约23222km。多系统卫星的协同工作,显著增加了全球范围内可见卫星数量,有效提升了定位的可靠性与精度。

(2) 地面端。地面控制部分是GNSS系统的“神经中枢”,主要由主控站、监测站和注入站组成。主控站负责收集、处理监测站的数据,计算卫星轨道和时钟参数,编制导航电文,并控制整个系统的运行;监测站分布在全球各地,不间断地接收卫星信号,对卫星的运行状态、信号质量等进行监测,采集数据并传送给主控站;注入站的任务是将主控站生成的导航电文注入相应卫星,确保卫星能够持续向用户发送准确的导航信息。

(3) 用户端。用户设备即GNSS接收机,依据不同的应用需求可分为测地型、导航型和授时型等。测地型接收机具备高精度定位能力,常用于大地测量、工程测量等领域,其能够接收并处理多频多星座信号,定位精度可达毫米级;导航型接收机则注重实时性和便携性,广泛应用于车辆导航、智能手机等,定位精度一般在米级;授时型接收机以高精度时间同步为核心功能,为通信、电力等对时间精度要求极高的行业提供服务。

## 1.2 定位原理

GNSS定位的核心原理基于空间距离后方交会,通过测量卫星到接收机的距离(伪距或载波相位),结合卫星的已知位置来确定接收机的三维坐标(经度、纬度、高度)。示意图如图1所示。

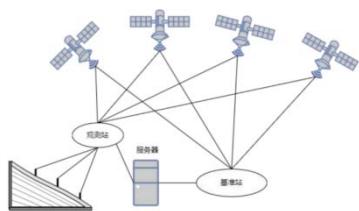


图1 GNSS定位原理图

(1) 伪距测量。伪距是GNSS定位的基础测量值,它是卫星信号从卫星发射到接收机接收的传播时间与光速的乘积,再加上各种误差。接收机通过对卫星信号中的测距码进行相关处理,

获取信号传播时间,进而计算伪距。由于伪距测量包含卫星钟误差、接收机钟误差、电离层延迟、对流层延迟等多种误差,其定位精度一般在10~100米量级,适用于对精度要求不高的导航、粗略定位等场景。

(2) 载波相位测量。载波信号是GNSS卫星发射的高频正弦波信号,具有更高的测量精度。载波相位测量是通过测量接收机接收到的卫星载波信号与接收机本地产生的参考载波信号之间的相位差,来确定卫星到接收机的距离。由于载波信号波长较短,理论上载波相位测量可以达到毫米级精度。

(3) 差分定位技术。差分GNSS(DGNSS)技术基本原理是在已知精确位置的基准站上设置GNSS接收机,连续观测卫星信号,计算出基准站的定位误差,然后通过数据通信链路将误差信息发送给附近的移动站(用户接收机)。移动站根据接收到的误差信息对自身测量值进行修正,从而提高定位精度。根据差分数据的类型和处理方式,差分定位可分为伪距差分(RTD)、载波相位差分(RTK)和精密单点定位(PPP)等。

## 1.3 关键技术

(1) 多星座融合技术。随着全球卫星导航系统的不断发展,单一系统的局限性逐渐凸显。多星座融合技术通过同时接收和处理多个卫星导航系统(如GPS+BDS+GLONASS+Galileo)的信号,增加了可见卫星数量,改善了卫星几何分布,有效提升了定位的可靠性和精度。在城市峡谷、山区等卫星信号遮挡严重的区域,多星座融合能够显著减少信号失锁现象,保证定位的连续性;在动态测量场景中,更多的卫星观测值有助于提高定位的稳定性和抗干扰能力。

(2) 抗多路径效应技术。多路径效应是指卫星信号通过多条路径到达接收机,不同路径的信号相互干涉,导致测量误差。在水利工程测量中,水面、混凝土坝面等光滑表面容易产生多路径反射,严重影响测量精度。为抑制多路径效应,一方面可采用特殊设计的抗多路径天线,其通过物理结构设计减少反射信号进入天线;另一方面,利用数据处理算法对多路径误差进行建模和修正,能够实时动态地补偿多路径误差,将误差控制在毫米级以内。

(3) 实时数据处理与传输技术。在水利工程自动化监测中,实时获取测量数据至关重要。实时数据处理技术通过优化算法和硬件性能,实现对GNSS观测数据的快速解算,实时数据传输技术则借助4G/5G通信网络、北斗短报文等手段,将测量数据及时传输至数据中心。在偏远地区或通信网络覆盖不足的区域,北斗短报文功能可实现无网络环境下的数据传输,确保监测数据的完整性和及时性。

## 2 GNSS技术在大坝与边坡变形监测中的应用

### 2.1 变形监测技术含义

变形是自然界中普遍存在的现象,它指的是在各种荷载作用下,变形体的形状、大小及位置在时间域和空间中的变化。通过测量和专用仪器监测,来确定变形体在各种荷载和外力作用下,形状、大小及位置的变化,以便提早预防和避免可能引发的

灾害。通过在工程变形监测点上设置接收机,可以实时测量变形监测点的三维坐标,快速发现变形情况。

### 2.2 GNSS监测技术

GNSS技术因其全球性、高精度、实时性、低成本的优势成为变形监测技术测量的主要手段。GNSS技术在基于全球坐标系统变化的条件下能够在不受局部变形的影响下,对全球和全区域内的水利工程所在地球板块的运动提供检测,继而为水利工程所在区域地震监测提供数据支持。GNSS技术因其具有全球性的位置定位特点和快速高效的优势能够对水利工程变形进行更好地监测。

### 2.3 GNSS技术在变形监测中的应用

实时监测系统持续更新位移数据。每当接收到新数据时,系统会自动进行计算和分析,确保监测信息的时效性。对位移数据进行趋势分析,识别长期变化趋势和短期异常波动。通过绘制位移曲线图和趋势图,监测人员能够快速了解边坡的变化情况。实时监控数据中的异常波动,识别可能的风险。

### 2.4 GNSS技术在朔州市镇子梁水库的具体应用

镇子梁水库是建在海河流域永定河水系桑干主要支流浑河上的一座中型水库。镇子梁水库除为浑河灌区提供水源保障外,还担负着举世闻名的应县木塔等重要文物以及下游沿河两岸28个村镇,4.3万人,9.9万亩耕地安全度汛的艰巨任务,镇子梁水库本身的安全与否也直接影响着下游册田水库乃至官厅水库和首都北京的安全,其防洪效益不可估量。原有的大坝安全监测设施有渗漏水位、浸润线、主坝水平和垂直位移。水位尺设在泄洪闸前北翼墙上。渗漏量在主坝下游用无喉道量水堰观测,另外,在主坝上下游护坡有测压管观察浸润线,但因年久失修起不到观测作用。主坝水平位移垂直位移,因测点布置不够,也不能观测。因此我们在22年的除险加固工程中包含了镇子梁水库的GNSS信息化建设,今年完工建成。自此,GNSS接收机24小时不间断地监测着大坝的安全。

## 3 GNSS在水文监测中的应用

### 3.1 水文监测

在水文监测领域,GNSS-R(GNSS反射信号)技术逐渐崭露头角。该技术利用GNSS卫星信号经水面反射后的特性,通过分析反射信号强度、相位等参数反演水位变化。相较于传统水位测量方法,GNSS-R技术无需在水中安装传感器,水位测量精度可达3~5cm,镇子梁水文站是监测镇子梁水库的水文站,为镇子梁水库提供各种水文资料。通过GNSS接收机,能更便捷高效地为镇子梁水库提供各种水情资料。

### 3.2 灌区信息化

浑河灌区分东西两个灌区,设有干渠四条支渠三条,干支两级建筑物350余处。现仍采用人工计量与人工调度,不仅费时费力,误差还很大。下一步我们将考虑在灌区各个农田渠道分水口的关键位置布设GNSS定位传感器,结合物联网技术,实时监测水

流流量、流向数据。管理人员可通过远程监控平台,根据作物需水情况和土壤墒情,精准控制灌溉水量,实现水资源的高效利用,同时为灌区水资源管理提供数据支持,推动农业灌溉向智能化、精细化方向发展。

## 4 GNSS技术在水利工程监测中的未来发展方向

### 4.1 技术融合与创新驱动

未来,GNSS技术将与5G、物联网、大数据、人工智能等前沿技术深度融合,构建全方位、智能化的水利工程监测体系。

### 4.2 智能化与自动化发展

#### 4.2.1 智能决策支持系统

基于GNSS技术的智能化决策支持系统将成为水利工程管理的核心工具。该系统通过对实时监测数据的深度分析,结合水利工程的物理模型与历史数据,运用机器学习中的强化学习算法,为管理者提供科学的决策建议。在水库调度中,系统可根据GNSS监测的大坝变形、水位变化以及流域内的气象数据,自动生成最优的放水方案,在保障大坝安全的前提下,实现水资源的合理利用与防洪减灾效益最大化。

#### 4.2.2 自动化监测运维

未来水利工程的GNSS监测系统将具备高度自动化运维能力。设备能够自动检测自身运行状态,一旦发现故障,立即启动自我修复程序或自动切换至备用设备,确保监测工作不间断。

## 5 结语

综上所述,在大坝变形监测与水文监测领域,GNSS技术发挥着关键作用,推动水利工程监测向智能化、自动化方向发展,为水利工程的安全运行与科学管理提供坚实的技术支撑,助力行业实现高质量发展。未来,随着低轨卫星星座、量子通信等技术的融入,GNSS有望与智能传感网络深度耦合,形成全空间、全要素、全周期的水利工程智慧监测体系,为水旱灾害防御、大坝安全管理等提供精准化、智能化的技术支撑。

## 参考文献

- [1] 赵静,曹冲.GNSS系统及其技术的发展研究[J].全球定位系统,2008,33(05):27~31.
- [2] 陈石磊.GPS载波相位定位技术的研究[D].西安市:西安电子科技大学,2008.
- [3] 李鹤峰,党亚民,秘金钟.BDS与GPS、GLONASS多模融合导航定位时空统一[J].大地测量与地球动力学,2013,33(4):73~78.
- [4] 李宗春,李广云.我国大坝变形监测技术现状与进展[J].测绘通报,2002,(10):19~21.
- [5] 姜卫平.卫星定位技术在水利工程变形监测中的应用进展与思考[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1625~1634.

## 作者简介:

谢英(1972--),女,汉族,山西省朔州市应县人,本科,工程师,研究方向:农水工程。