

# 高精度GNSS在变形监测中的应用与误差分析

刘国强

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西 西安 710100

**摘要：**本文详细阐述了高精度全球导航卫星系统（GNSS）在变形监测领域的应用情况。首先介绍了变形监测的重要意义以及传统监测方法的局限性，进而引出高精度GNSS技术的优势。接着深入探讨了高精度GNSS在各类工程变形监测中的具体应用，包括大坝、桥梁、高层建筑等。同时，对高精度GNSS在变形监测过程中可能产生的误差来源进行了全面分析，涵盖与卫星信号传播相关的误差、与接收设备相关的误差以及外界环境因素导致的误差等，并针对性地提出了相应的误差处理策略和方法。旨在为高精度GNSS在变形监测领域的进一步推广和应用提供理论支持和实践指导。

**关键词：**高精度GNSS；变形监测；误差分析；应用

## 1 引言

变形监测是通过对监测对象进行定期或实时的测量，获取其空间位置、形态等随时间的变化信息，以评估其安全性和稳定性。在各类大型工程建设和地质灾害防治中，变形监测具有至关重要的意义。例如，大坝的变形监测能够及时发现大坝结构的异常变化，预防溃坝等灾难性事故的发生；桥梁的变形监测有助于掌握桥梁在车辆荷载、自然环境等因素作用下的健康状况，保障交通安全；高层建筑的变形监测可以确保建筑物在施工和使用过程中的安全性。传统的变形监测方法主要包括水准测量、三角测量、全站仪测量等。这些方法虽然在一定程度上能够满足变形监测的需求，但存在测量效率低、劳动强度大、受地形和气候条件限制等缺点。随着全球导航卫星系统（GNSS）技术的不断发展，高精度GNSS技术凭借其全天候、实时性、高精度、自动化程度高等优势，逐渐成为变形监测领域的重要手段。

## 2 高精度 GNSS 技术概述

### 2.1 GNSS系统的组成与原理

GNSS是一个全球性的卫星导航定位系统，主要包括美国的全球定位系统（GPS）、俄罗斯的格洛纳斯系统（GLONASS）、欧盟的伽利略系统（Galileo）和中国的北斗卫星导航系统（BDS）。GNSS系统由空间部分、地面控制部分和用户设备部分组成。空间部分由多颗卫星组成，这些卫星在预定的轨道上运行，向地面用户发射包含卫星位置、时间等信息的导航信号。地面控制部分负责对卫星进行监测和控制，确保卫星的正常运行和导航信号的准确性。用户设备部分即GNSS接收机，它能够接收卫星发射的导航信号，并通过数据处理计算出用户的三维坐标、速度和时间等信息。

### 2.2 高精度GNSS定位技术

高精度GNSS定位技术主要包括差分GNSS定位技术和精密单点定位技术。差分GNSS定位技术是通过在已知位置的基准站上设置GNSS接收机，同时观测卫星信号，并将基准站观测到的卫星信号与已知位置信息进行差分处理，得到差分改正数。然后将差分改正数发送给流动站，流动站利用接收到的差分改正数对自己的观测数据进行修正，从而消除或减弱公共误差，提高定位精度。差分GNSS定位技术又可分为局域差分GNSS（LADGNSS）、广域差分GNSS（WADGNSS）等<sup>[1]</sup>。精密单点定位技术是利用国际GNSS服务组织（IGS）提供的精密卫星轨道和钟差产品，对单台GNSS接收机的观测数据进行处理，实现高精度的单点定位。与差分GNSS定位技术相比，精密单点定位技术不需要设置基准站，作业更加灵活方便，但定位精度相对较低，且收敛时间较长。

## 3 高精度 GNSS 在变形监测中的应用

### 3.1 大坝变形监测

大坝作为重要的水利工程设施，其安全性直接关系到下游地区人民生命财产安全和经济社会稳定。大坝在长期运行过程中，会受到水压力、温度变化、地基沉降等多种因素的影响，导致坝体发生变形。如果变形超过一定限度，将会影响大坝的正常运行，甚至引发溃坝事故。高精度GNSS技术可以实时、连续地监测大坝的水平 and 垂直位移变化。通过在大坝上布置多个GNSS监测点，利用高精度GNSS接收机对监测点进行长期观测，并将观测数据传输到数据处理中心进行分析处理。通过对监测数据的分析，可以及时掌握大坝的变形情况，为大坝的安全评估和决策提供科学依据。例如，某大型水电站采

用高精度GNSS技术对大坝进行变形监测。在坝体上布置了多个GNSS监测点，监测点的定位精度达到了毫米级。通过长期的监测数据分析，发现大坝在某些部位的变形存在一定的规律性，与水库水位变化、温度变化等因素密切相关。根据监测结果，及时采取了对大坝进行加固处理等措施，有效保障了大坝的安全运行。

### 3.2 桥梁变形监测

桥梁在车辆荷载、风荷载、地震等外力作用下，会发生不同程度的变形。桥梁的变形过大会影响桥梁的结构安全和正常使用，甚至导致桥梁垮塌。因此，对桥梁进行变形监测是保障桥梁安全的重要措施。高精度GNSS技术可以实现对桥梁结构的实时动态监测。通过在桥梁的关键部位布置GNSS监测点，利用高精度GNSS接收机对监测点进行连续观测，获取桥梁在不同荷载作用下的变形信息。同时，结合其他传感器（如加速度传感器、应变传感器等）的监测数据，可以全面了解桥梁的结构健康状况。例如，某跨海大桥采用高精度GNSS技术对桥梁的挠度进行监测。在桥梁的主梁上布置了多个GNSS监测点，通过实时监测主梁的垂直位移变化，得到了桥梁在不同车辆荷载作用下的挠度曲线。通过对挠度曲线的分析，评估了桥梁的结构安全性能，为桥梁的养护和管理提供了重要依据。

### 3.3 高层建筑变形监测

高层建筑在施工和使用过程中，会受到自重、风荷载、地震等作用的影响，导致建筑物发生沉降、倾斜等变形。高层建筑的变形过大会影响建筑物的结构安全和使用功能，甚至危及人员的生命安全。高精度GNSS技术可以实时监测高层建筑的水平和垂直位移变化。通过在建筑物的顶部和底部布置GNSS监测点，利用高精度GNSS接收机对监测点进行长期观测，获取建筑物的变形信息。同时，结合建筑物的结构设计参数和施工进度等信息，可以对建筑物的变形进行预测和预警<sup>[2]</sup>。例如，某超高层建筑在施工过程中采用高精度GNSS技术对建筑物的沉降和倾斜进行监测。在建筑物的不同楼层布置了多个GNSS监测点，通过实时监测监测点的三维坐标变化，及时发现建筑物在施工过程中出现的异常变形情况。根据监测结果，及时调整了施工方案，确保了建筑物的施工安全。

## 4 高精度 GNSS 变形监测误差分析

### 4.1 与卫星信号传播相关的误差

#### 4.1.1 电离层延迟误差

电离层是距离地面约50-1000km的大气层，其中的自由电子会对GNSS卫星信号产生折射和延迟作用，导致信

号传播时间变长，从而使测量距离产生误差。电离层延迟误差的大小与电离层的电子密度、卫星信号的频率等因素有关，一般在白天较强，夜晚较弱。为了减小电离层延迟误差的影响，可以采用双频观测技术。由于电离层延迟与信号频率的平方成反比，通过同时观测两个不同频率的卫星信号，可以消除电离层延迟误差的一阶项影响。此外，还可以利用电离层模型对电离层延迟误差进行修正。

#### 4.1.2 对流层延迟误差

对流层是距离地面约0-50km的大气层，其中的水汽和干空气会对GNSS卫星信号产生折射和延迟作用，导致信号传播时间变长，从而使测量距离产生误差。对流层延迟误差的大小与对流层的大气参数（如温度、气压、湿度等）有关，且具有明显的地域性和季节性变化。为了减小对流层延迟误差的影响，可以采用对流层模型进行修正。常用的对流层模型有霍普菲尔德模型、萨斯塔莫宁模型等。此外，还可以采用无电离层组合观测值的方法，在一定程度上削弱对流层延迟误差的影响。

### 4.2 与接收设备相关的误差

#### 4.2.1 接收机钟差

GNSS接收机内部使用的时钟一般采用石英钟，其精度与卫星钟相比要低得多。接收机钟差会导致测量距离产生误差，且该误差与卫星和接收机之间的距离无关。为了消除接收机钟差的影响，在GNSS定位中通常将接收机钟差作为一个未知参数，与其他未知参数（如接收机的三维坐标）一起进行解算。此外，还可以采用高精度的原子钟作为接收机的时钟，但成本较高。

#### 4.2.2 接收机天线相位中心偏差

GNSS接收机天线的相位中心是其接收卫星信号的等效中心，但在实际测量中，天线的相位中心与几何中心往往不重合，存在一定的偏差。接收机天线相位中心偏差会导致测量距离产生误差，且该误差与卫星的方向有关<sup>[3]</sup>。为了减小接收机天线相位中心偏差的影响，可以采用天线相位中心校正模型对测量数据进行修正。此外，在变形监测中应尽量使用同一类型的天线，并保持天线的安装方向一致。

### 4.3 外界环境因素导致的误差

#### 4.3.1 多路径效应误差

多路径效应是指GNSS卫星信号在传播过程中，遇到建筑物、水面等反射物时，会产生反射信号，反射信号与直接信号相互干涉，导致接收机接收到的信号发生畸变，从而使测量距离产生误差。多路径效应误差的大小与反射物的性质、反射面与接收机天线的距离等因素有

关,且具有随机性和周期性变化。为了减小多路径效应误差的影响,可以采用以下措施:选择合适的监测点位置,尽量避免在反射物附近设置监测点;采用抗多路径效应的天线,如扼流圈天线等;在数据处理中采用多路径效应抑制算法,如小波分析、卡尔曼滤波等。

#### 4.3.2 外界环境干扰误差

外界环境中的电磁干扰、机械振动等因素也会对GNSS接收机的正常工作产生影响,导致测量数据出现误差。例如,在高压输电线路附近、大型机械设备附近等环境中,电磁干扰较强,可能会影响GNSS卫星信号的接收质量。为了减小外界环境干扰误差的影响,应尽量避免在强电磁干扰环境中设置监测点。同时,在接收机的设计和安装过程中,应采取相应的抗干扰措施,如采用屏蔽电缆、加装滤波器等。

### 5 误差处理策略与方法

#### 5.1 模型修正法

模型修正法基于对误差产生机理的深入理解,利用已知的误差模型对测量数据进行修正,以消除或减弱误差的影响。例如,在卫星导航定位中,电离层延迟误差和对流层延迟误差是影响定位精度的重要因素。针对电离层延迟,可采用克罗斯布歇模型、本特模型等电离层模型进行修正;对于对流层延迟,可利用霍普菲尔德模型、萨斯塔莫宁模型等进行处理。此外,接收机天线相位中心偏差也会引入误差,通过采用天线相位中心校正模型,可对其进行有效修正,提高测量精度。

#### 5.2 差分技术

差分技术通过在已知位置的基准站上设置GNSS接收机,同时观测卫星信号,并将基准站观测到的卫星信号与已知位置信息进行差分处理,得到差分改正数。随后,将这些差分改正数发送给流动站,流动站利用接收到的差分改正数对自己的观测数据进行修正<sup>[4]</sup>。这种方法能够消除或减弱公共误差,如卫星钟差、星历误差、大气延迟误差等,显著提高定位精度。差分技术广泛应用于局域差分GNSS和广域差分GNSS中,为各类高精度定位需求提供了有力支持。

#### 5.3 数据滤波与平滑处理

数据滤波与平滑处理旨在去除测量数据中的噪声和异常值,提高数据的质量和可靠性。常用的数据滤波方法有小波分析和卡尔曼滤波等。小波分析具有多分辨率分析的特点,可以将信号分解到不同的频率段,从而有效地去除噪声和异常值,保留信号的有用信息。卡尔曼滤波则是一种递归的动态滤波方法,它能够根据系统的状态方程和观测方程,对系统的状态进行最优估计,适用于实时处理动态数据。此外,移动平均、指数平滑等平滑处理方法也可用于减少数据的随机波动,提高数据的稳定性。

#### 结语

本文详细阐述了高精度GNSS在变形监测中的应用与误差分析。高精度GNSS技术凭借其全天候、实时性、高精度、自动化程度高等优势,在大坝、桥梁、高层建筑等工程变形监测中得到了广泛应用。同时,对高精度GNSS在变形监测过程中可能产生的误差来源进行了全面分析,并提出了相应的误差处理策略和方法。

随着GNSS技术的不断发展和创新,高精度GNSS在变形监测领域的应用前景将更加广阔。未来,可以进一步研究多系统融合的GNSS变形监测技术,提高监测的精度和可靠性;加强GNSS变形监测与物联网、大数据、人工智能等技术的融合,实现变形监测的智能化和自动化;开展GNSS变形监测在地质灾害预警、城市安全监测等领域的拓展应用,为保障人民生命财产安全和社会稳定发展提供更加有力的技术支持。

#### 参考文献

- [1]胡文丹,陈旭升.GNSS自动化变形监测系统设计与研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(10):145-148.
- [2]唐勇.GNSS在水库滑坡体变形监测中的应用[J].云南水力发电,2025,41(07):70-72.
- [3]曹石磊,方猛,焦元冰.GNSS变形监测数据降噪方法研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(06):209-213.
- [4]孙澳.面向复杂环境变形监测的GNSS多路径误差实时处理方法[D].中国矿业大学,2024.