

# 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和垂直位移变化。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。桥梁的变形过大将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将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位移和垂直位移变化。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 错误处理策略与方法

#### 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经济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.