

# 基于北斗高精度定位技术的煤矿安全监测监控系统应用研究

李志华 刘亚 高宇 李忠忠

2021年,我国北斗三号迈入全面应用推广阶段,北斗+矿业成为了一个新尝试的应用领域,北斗高精度的时空信息给煤矿安全带来新的变革。井工煤矿开采会导致地面形成塌陷区,露天矿开采容易发生滑坡,煤矿的井架、煤仓、栈桥等高危建筑物会随着时间的变化发生微小的形变,这些都会对煤矿工人的生产工作和周边居民的生活造成安全隐患。在过去,煤矿基本通过人工不定期的测量方式,采用水准仪等高精度设备进行测量,这种测量数据受人员、环境和天气影响,测量数据不连续、不及时,不能实时反映监测对象的变化,造成煤矿安全事故时有发生,对地面铁路、管道、房屋等设施造成严重破坏。

## 北斗高精度定位形变监测系统

随着我国北斗定位系统的技术完善和应用发展,北斗高精度定位技术愈加成熟,相关技术指标也在不断提高(形变监测静态指标达到毫米级)。基于北斗高精度技术的形变监测系统是一种利用GNSS高精度定位系统,进行24 h地表不间断监测的技术,系统综合卫星导航定位技术、无线通信技术、视频监控技术、数据建模差分解析技术、数据综合分析预警技术进行集成应用开发,可对煤矿地质安全监测数据(沉降量、速度、加速度)进行采集,形成多形态(数据、曲线、平面图、对比图)展示界面,设定数据预警,对整个煤矿要求监测区域进行监测监控。相关监测监控数据可结合煤矿矿震数据、冲击地压、地质环境等数据进行地质监测智能化分析,为煤矿安全开采提供必

要的数据支撑。

基于北斗高精度定位技术的形变监测监控系统是一个综合多项技术的应用系统,通过多传感数据、全方位全时空的监测监控,实现塌陷区的微小变化监测、趋势预判分析,该系统具有连续监测、数据对比分析、微小形变监测等特征。从系统功能区分上来说,北斗高精度定位形变监测系统总体由4部分组成:①传感器子系统:由布置监测点上的各类北斗形变监测终端组成;②数据传输子系统:基于公网的4G/5G通信系统、无线自组网通信系统、光纤和以太网通信系统;③数据处理与控制子系统:由布置在云端的数据解算系统、服务器平台应用系统组成;④辅助支持系统:包括太阳能供电系统、防雷系统、视频监控系统、环境数据采集系统等。

煤矿塌陷区形变监测监控系统网络拓扑如图1所示,整个监测监控系统由塌陷区的N个监测点、基准站、4G/5G传输、监测中心4部分组成。

(1)监测点:以GNSS形变监测终端为核心,通过太阳能系统供电,防雷设计、视频监控设计进行统一集成应用。

(2)基准站:为监测点提供差分数据,通过相对位移变化监测,确定监测站的位置变化信息。

(3)4G/5G传输:基于公网4G/5G进行相应的数据信息传输,实现监测点、基准站与监测中心的互联互通。

(4)监测中心:位置变化数据进入监测中心解算服务器,服务器解算后将数据输出到应用平台,平台通过图表、成果形态等综合数据展示、分析,为相应的决策提供支撑。

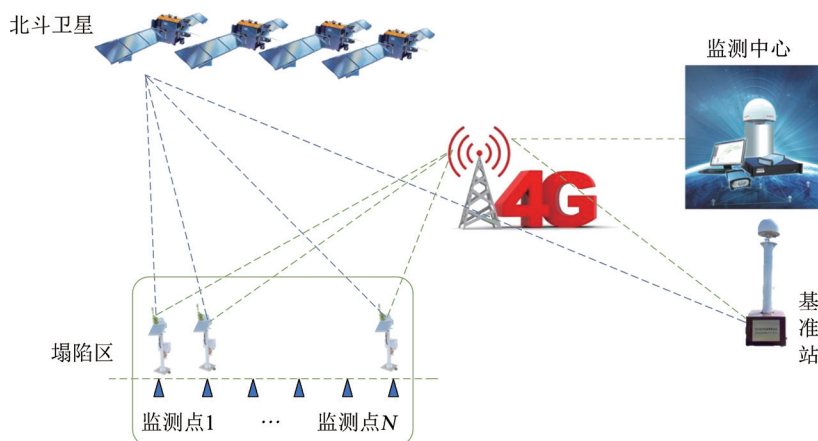


图1 煤矿塌陷区形变监测监控系统网络拓扑

## 煤矿塌陷区形变监测监控系统设计

### 终端设计

北斗高精度定位形变监测系统终端采用北斗RTK精准定位和后处理数据分析技术,监测矿区井架、矸石山、基点沉降,通过4G/5G无线通信技术,实时高效传输差分服务数据,实现相关建筑的毫米级监控,并上传形变轨迹、矿震沉降、位置等相关信息至服务平台。

北斗高精度定位形变监测系统终端设计主要包含硬件电路设计、结构设计、嵌入式设计、接口设计等。硬件电路设计主要包含相关模块的技术选型及外围电路设计,如通信模块、北斗模块、电源、对外接口、存储等硬件电路设计以及抗干扰设计等;其中,硬件组成的核心是通信模组和高精度定位模组,北斗高精度定位模组用来直接获取卫星原始观测数据,通信模组实现处理后的卫星数据远程传输。北斗高精度定位形变监测系统终端组成如图2所示。

其中,MCU处理器是整个北斗高精度定位形变监测系统终端的核心部分,负责整个系统的稳定运行,包括管理控制各功能模块的启动运行和数据运算,同时还负责整个终端的调试、扩展等任务。电源模块用于对整个电路提供电源。

定位模块是指UM960北斗差分定位板卡,通过串行口与主控制器相连,实时给主控发送北斗原始观测数据。

无线通信模块可以用于传输终端的GNSS以及IMU原始数据至后台,后台接收到定位数据可以对

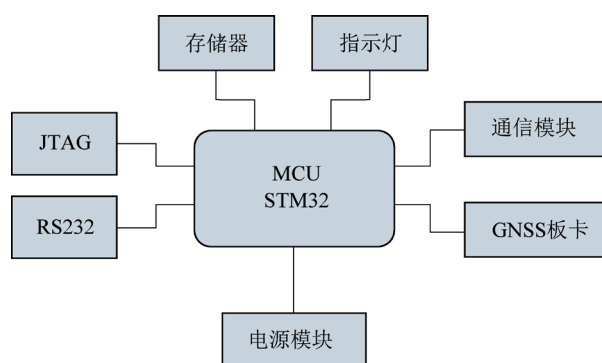


图2 北斗高精度定位形变监测系统终端组成

终端设备进行实时的监测管理。其他存储控制器主要用于终端数据的存储,JTAG和RS232主要用于设备开发调试等。

### 算法开发

基于精准位置服务平台的差分改正数据,形成双差定位观测方程,并结合Kalman滤波估计方法得到实时的估计载波相位实数模糊度值,利用LAMBDA估计方法,实时解算整周模糊度;如果模糊度检验通过,则可实时输出厘米级的定位结果,经过数据后处理分析,输出毫米级定位结果。RTK定位算法处理流程(图3)如下:

(1) 设计各种不同约束条件下的测试试验方案,获取需要的GNSS观测数据。

(2) 深入研究GNSS观测数据的预处理方法。针对动态相对定位中电离层变化快、残余误差较大的情况,可以通过改进现有的周跳探测方法(如Turbo Edit法)提高探测效果,更重要的是充分利

用多频观测值信息探索新的方法。一是构建满足Geometry-Free特性的线性组合，使其能够最大程度地降低组合噪声水平以及电离层误差放大因子，在此基础上进行历元间差分或多历元平滑；二是尝试借鉴模糊度解算中的TCAR方法，从较易确定周跳大小的超宽巷组合开始，通过约束，逐步确定宽巷组合以及窄巷组合的周跳，最终恢复原始观测值的周跳；三是可以考虑当电离层处于活跃期时，联合使用TEC变化率（TECR）和MW宽巷组合观测值（MWVL）方法。在此基础上，获取“干净”的载波相位观测数据。

（3）从GNSS基本的伪距和载波观测方程出发，仔细探讨求差后观测方程中各种未知参数的特性及相应的处理方式，推导和建立多频GNSS动态相对

定位的函数模型，并利用大量实测数据分析比较不同条件下的双差相对定位模型，从而获得最佳的参考性选择策略。对于随机模型，拟采用赫尔默特方差分量估计进行随机模型精化，以获取最优结果。

（4）利用卡尔曼滤波对双差方程进行求解获取相对定位结果的实数解。

（5）针对中长距离相对定位解算，拟采用参数估计的方法对对流层延迟误差和电离层延迟误差进行处理。对于对流层延迟误差，将残余对流层延迟误差表示为相对天顶对流层延迟参数（RZTD）和映射函数的形式，并对RZTD进行参数估计。对于电离层延迟误差，拟采用对电离层参数附加相对约束（将残余双差电离层延迟误差看作是随机游走过程）和绝对约束（附加电离层伪观测值），在此

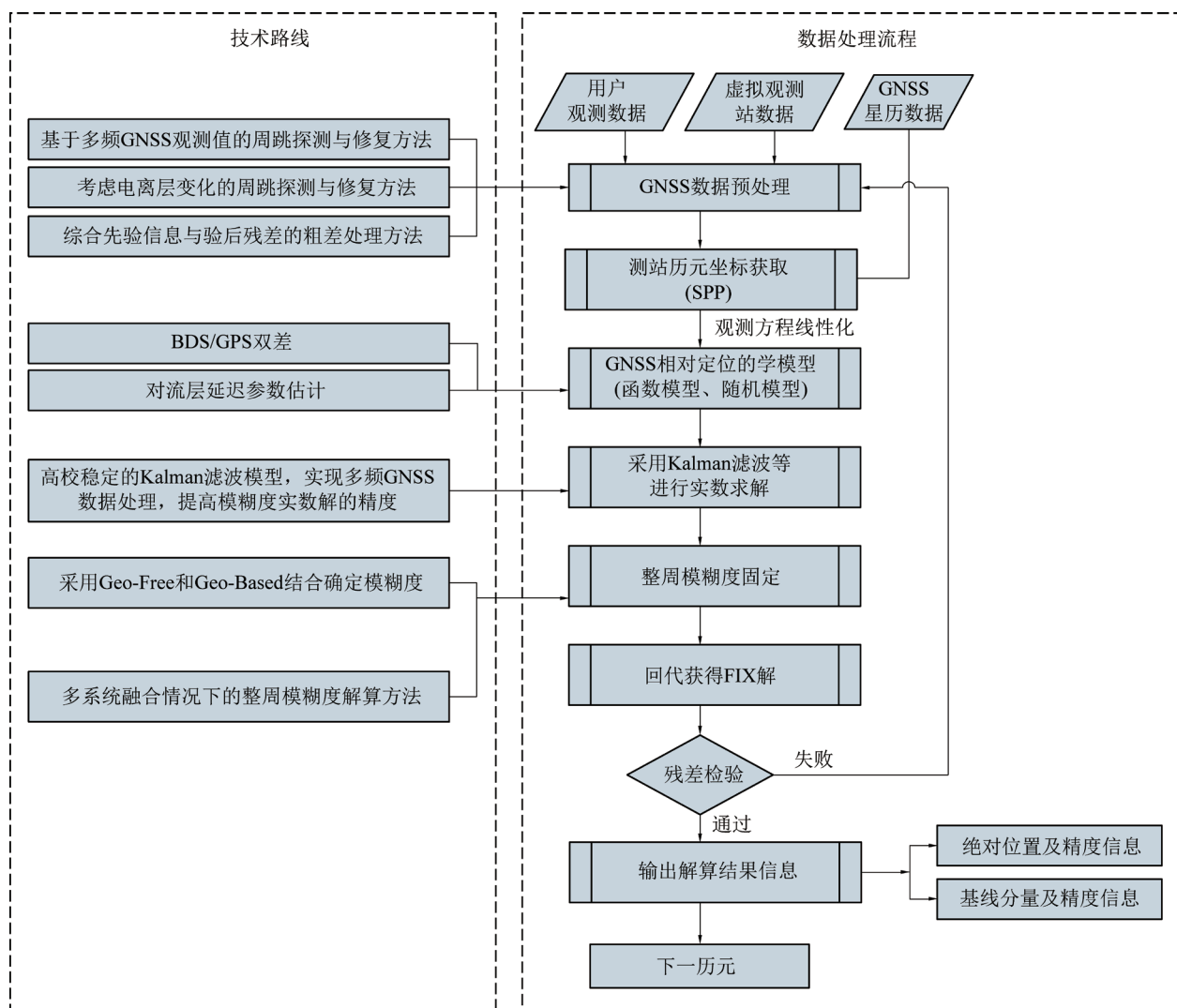


图3 RTK定位算法处理流程

基础上增强模型的强度和收敛速度,提高模糊度浮点解的精度。此外,对于双频或三频观测,也将采用多频电离层组合观测值来消除电离层的影响,并在此基础上争取实现模糊度固定。

(6) 结合多频多系统动态定位的特点,研究快速确定模糊度的方法。针对多频模糊度,可以建立一定的搜索准则,从众多组合中选取具有大波长、弱(削)电离层、低观测噪声的最优组合观测值,进行模糊度搜索,以最大程度地减少模糊度固定的时间,甚至实现模糊度的单历元固定。在固定策略上可以采用Geo-Free与Geo-Based相结合的方式。在多系统观测条件下,模糊度参数数目众多、精度不一,对高维模糊度的快速解算:一是从降相关、快速搜索2个方面开展攻关;二是尝试采用部分模糊度固定的方法来解决,通过设定合理的准则(如跟踪历元数、高度角、图形结构、卫星数目、模糊度浮点解精度等)来选择容易固定的模糊度,提高固定成功率,满足动态定位的实时性要求。

(7) 模糊度固定后,还可基于验后残差检验进行粗差探测与消除;或采取抗差卡尔曼滤波的方法,通过调整观测值权矩阵,最终实现降低异常观测值对参数估计的影响。

(8) 在上述理论研究基础上,研制程序实现算法,并对理论和方法进行验证;通过深入分析结果,进一步精化随机模型,减弱和消除残余误差影响,判断参数估计间的相关性,有针对性地提出相关解决办法。

(9) 设计不同条件下的GNSS静态、动态相对定位试验测试方案,比较验证所提算法和模型的可行性和稳定性,并不断测试与改进,最终建立较完整的多频BDS/GPS相对定位模型与算法,丰富和发展GNSS数据处理理论和方法。

## 平台设计

北斗高精度定位形变监测系统平台采用4层B/S结构,基于Java Spring Boot技术开发系统应用平台,整个系统主要分为访问层、展示层、业务层、

数据接口层。在各层之间还有相关的接口设计和环境部署等内容。平台支持Windows系统、Ubuntu系统的部署,数据库支持缓存和持久化存储,数据接口根据通信接口进行自定义设计,衔接业务层和数据库。平台的接入需要经过鉴权,进行服务认证,提高数据安全管理;前端的UI支持2种样式终端,一种是基于PC端的应用界面设计,采用web访问方式,另一种是基于移动手持终端的界面设计,采用APP方式;平台的访问设计兼容多种方式,便于数据安全管理人员的移动应用。系统平台架构及总体功能如图4所示。

### (1) 访问层

整套系统可以通过访问层的移动设备、PC端、电视大屏幕3端进行系统数据请求和处理结果展示。移动端主要用于上传精准位置信息、上报事件、上传文件、接受管控数据对设备的权限进行管控。PC端主要是管理系统配置项目,对移动端的设备权限进行配置,作为移动端管控的依据,用于人员、组织、上报信息、详细系统配置等信息。显示器大屏主要是用于显示移动设备的实时定位,以便于试调度。

### (2) 展示层

感知层位于访问层和数据接口层之间,通过HTTP、TCP/IP、Web Socket协议通信协议,进行访问层各终端之间的数据传输,确保数据在传输过程中的稳定、安全和规范。采用RESTFUL风格接口,保证开发过程中的规范性。关于GIS地图开发,按照OGC的标准进行,保证空间数据的交互操作。另外还采用了第三方开源接口,实现具有针对性的功能开发。

### (3) 业务层

在管控平台中,业务层主要处理电子围栏的相关业务,通过北斗卫星的高精度定位,用户在进入围栏时切换到工作模式,同时对移动终端的权限进行管控,对工作模式产生的数据进行加密上传和隔离,避免信息泄露保证企业安全,保证出问题能够追根溯源。通过使用SIP协议实现语音、视频通话的功能。在管控后台,业务层主要负责对



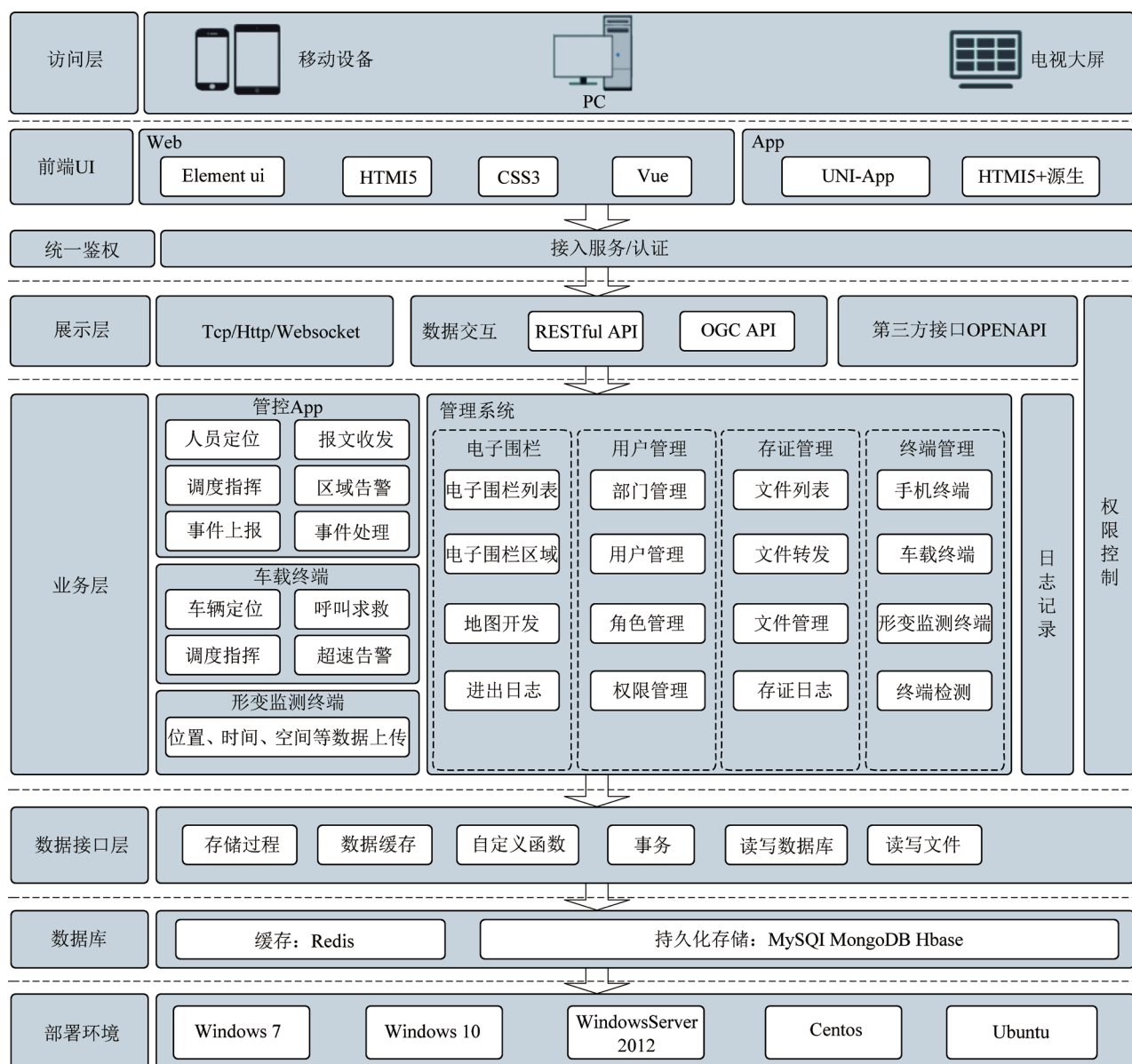


图4 平台架构及总体功能

管控APP上传的参数进行处理，并将处理结果返回给表示层，该层通过Rabbit MQ队列消息服务向管控APP发送管控指令，从而达到控制终端权限的目的。同时，业务层也通过Log4j对系统日志进行记录保存，确保系统在出现问题时进行准确排查和快速修复。

#### (4) 数据接口层

数据接口层主要用来定位、维护、访问和更新数据并管理和满足服务对数据的请求，用于给业务层逻辑提供数据支持，可以让用户便捷地访问持久性数据。

采用4层结构的模式，北斗高精度定位形变监测系统各层可以协调工作，使系统具备高稳定性、可延展性、可维护性和执行效率，便于维护和升级扩展。

### 煤矿塌陷区监测监控应用

东滩煤矿工作面从2021年8月初开始开采，该工作面附近靠近鲁皖输油管道以及中国石油中原输油管道，且附近为农作物种植基地，为了监测在开采过程中对地表位移沉降的实时数据以及对管网管道的影响并及时及早预警，于8月初对该工作面

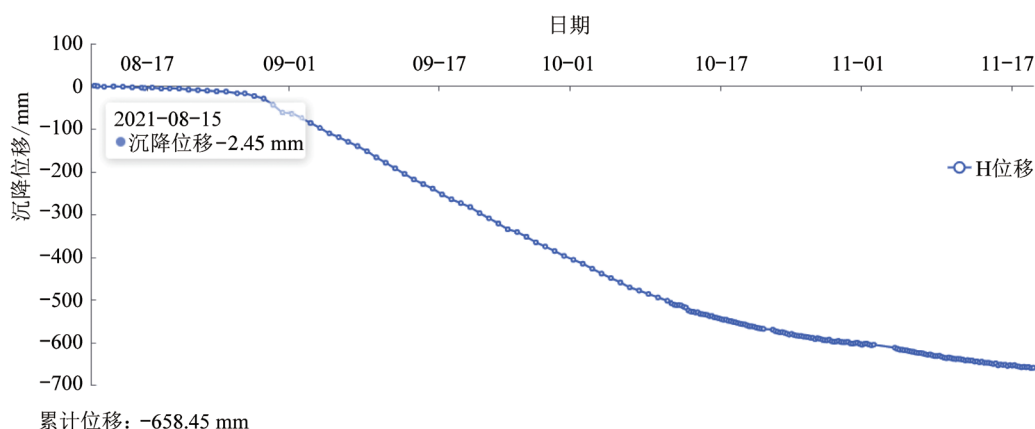


图6 监测点累计沉降位移



图5 北斗高精度地质沉降监测站

进行“6+1”监测。

在工作面现场沉降区布设6个监测点并安装设备，每个监测点相隔距离200 m左右。为了沉降区监测数据更加全面，在该工作面上方布设3个监测点，在工作面沉降边缘附件区域布设1个监测点，在开采工作面以外且在沉降区范围内放置2个监测点，对沉降区全方面整体的稳定性进行分析。

工作面安装部署包括太阳能供电系统、北斗监测终端、防雷系统、4G传输系统，相关系统终端和配件通过配电箱、立杆等方式进行集成部署，现场安装部署施工如图5所示。

监测站采集位移变化数据后，通过4G传输到数据解析处理后台，后台展示解算后将数据发送给服务平

台，平台进行监测数据分析与展示。通过平台监测数据，可以清晰看到每个监测点的沉降数据以及位移数据，例如监测点3累计沉降位移如图6所示。

## 结 语

笔者从系统设计和系统应用2个方面论述北斗高精度形变监测系统，通过阐述终端、算法、平台的设计内容，验证技术的可行性；同时，通过实际应用举例，证明这种监测系统带来的效果。基于北斗高精度定位技术的煤矿安全监测监控系统是一项综合监测技术，可以逐渐取代传统的人工水准仪测量方式，监测数据具备时空属性，连续不可更改，这种自动化监测手段解放了测绘人力资源，提高监测数据的稳定性和可靠性，对于矿山地底的冲击地压分析、矿震分析提供数据参考，为矿山的安全开采决策提供必要支撑；同时，该技术应用是北斗+矿山的新型技术应用，很好地解决了煤矿地质沉降监测实时性难题，可以拓展到煤矿边坡、井架、煤仓、栈桥等形变监测应用。

■ 责任编辑：李艾稣

### 作者简介：

第一作者：李志华，工程师，硕士，现任北斗天地股份有限公司北斗产品部部长。

E-mail: 277833904@qq.com

作者单位：北斗天地股份有限公司