

地质勘探装备的北斗系统应用研究与实践

韩菲¹, 黄洪波¹, 缪佳佳², 许春风¹

(1.中国地质装备集团有限公司,北京 100102; 2.中地装(北京)科学技术研究院有限公司,北京 100120)

摘要:本文在介绍我国北斗卫星导航系统发展和应用现状的基础上,结合地勘装备野外施工、运维管理、数据安全等特点和需求,提出了综合集成移动通信、互联网、宽带卫星通信等技术的地勘装备北斗系统应用的总体思路和技术框架,并详细介绍了中装集团钻探装备、物探仪器等两大类产品的北斗应用终端产品的型谱规划和应用平台的开发方案,对于提升地勘装备北斗应用技术水平具有较强的指导和借鉴意义。

关键词:地勘装备;北斗系统;钻探装备;物探仪器

中图分类号:P634.3;TN967.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)10-0006-07

Application of BDS in geological exploration equipment

HAN Fei¹, HUANG Hongbo¹, MIAO Jiajia², XU Chunfeng¹

(1.China Geological Equipment Group Co., Ltd., Beijing 100102, China;

2.CGE (Beijing) Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: Based on the introduction of the development and application status of BeiDou Navigation Satellite System (BDS) in China, and taking into account of the characteristics and requirements of field construction, operation and maintenance management and data security of geological exploration equipment, this paper proposes the overall conception and technical framework of the BDS application in geological exploration equipment through integration of mobile communication, internet, broadband satellite communication and other technologies. The paper also describes in detail the spectrum planning and the application platform development scheme of BeiDou application terminal products for drilling equipment and geophysical prospecting instruments, which can work as guidance and reference for better application of BDS in geological exploration equipment.

Key words: geological exploration equipment; BDS; drilling equipment; geophysical prospecting instrument

0 引言

随着网络化、数字化、智能化技术的不断发展,地质勘探装备信息化需求是必然的发展趋势。本文介绍了基于北斗卫星导航系统,综合集成移动通信、互联网、宽带卫星通信、智能传感和移动互联技术,构建地勘装备信息化的总体思路和方案框架,实现地勘装备的定位、授时、监控和管理,搭建地勘装备北斗监控与信息服务平台,解决野外地质勘探急需的多层次、多手段应急通信保障、设备运行状态信息一体化采集与处理、集群作业调度与管理等需求,加强对野外地质勘探队伍的高效安全监控、对同地质

队或同矿区设备的便捷协同指挥、对野外施工地质装备设备的快速故障诊断、运行状态分析及售后服务保障能力,提供优质、高效的装备支撑与信息服务,提升我国地勘装备整体现代化和信息化服务水平。

1 北斗卫星导航系统简介

北斗系统是我国自主研发、分步建设、独立运行,并与世界其他卫星导航系统兼容共用的卫星导航系统,目前可为全球用户提供全天候、全天时、高精度的快速定位导航和精密授时服务,并兼具独特

收稿日期:2019-09-04 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.10.002

基金项目:国家重点研发计划项目“5000米地质岩心钻机关键技术与装备研制”(编号:2018YFC0603402)

作者简介:韩菲,女,汉族,1985年生,高级工程师,材料学专业,硕士,主要从事地勘装备技术管理工作,北京市朝阳区望京西园221号博泰大厦5层,hanfei@cgeg.com.cn。

引用格式:韩菲,黄洪波,缪佳佳,等.地质勘探装备的北斗系统应用研究与实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(10):6-12.

HAN Fei, HUANG Hongbo, MIAO jiajia, et al. Application of BDS in geological exploration equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(10):6-12.

的短报文通信功能。

1.1 北斗卫星导航系统发展历程

1994 年北斗卫星定位导航系统启动建设,中国开始试验从覆盖本土、到亚太地区、再为全球提供服务的“三步走”卫星导航系统建设之路。2000 年发射的两颗“北斗一号”卫星组成的“北斗一号”系统使中国成为世界上除美俄之外第三个拥有自主卫星导航系统的国家^[1],但“北斗一号”系统与美俄卫星导航系统相比缺陷明显:系统覆盖范围较窄,仅可以为本土提供区域有源定位服务;定位精度较低、定位时间较长;用户容量有限等^[2]。2012 年年底,“北斗二号”系统构建了实时连续导航与定位相融合的北斗技术体制^[3],可以向亚太地区提供无源定位、测速、授时及短报文通信服务。目前,我国正在实施“北斗三号”系统建设,2018 年底已完成基本系统建设,正式向全球提供服务。预计于 2020 年将全面建成“北斗三号”系统,全方位提升系统服务性能,为全球提供更优质服务,2035 年前还将建设完善更加泛在、更加融合、更加智能的综合定位导航授时(PNT)体系^[4]。

1.2 北斗系统的性能特点

北斗系统目前提供的定位、授时、短报文通信服务性能如下:水平、高程的定位精度均优于 10 m (95%置信度),测速精度优于 0.2 m/s(95%置信度),授时精度优于 20 ns(95%置信度),其中在亚太大部分地区的水平、高程的定位精度均优于 5 m (95%置信度),授时精度优于 10 ns^[5]。北斗短报文通信功能理论上的传输能力达 1680 bit(约 120 个汉字)/次^[6]。

北斗系统虽然起步较晚,但发展迅速,具有独特的后发优势特点^[7]:

一是北斗系统的安全可控性,具有独立自主知识产权,摆脱了对国外卫星导航系统的依赖。

二是北斗系统独特融合了导航定位与短报文通信功能,在公共通信网络中断或无通信网络地区,也可实现双向通信。

三是北斗系统空间段采用倾斜地球同步轨道卫星(IGSO)、中圆地球轨道卫星(MEO)、地球同步轨道卫星(GEO)三种轨道卫星组成的混合星座,与其他卫星导航系统相比高轨卫星更多,抗遮挡能力强,区域性能增强,尤其在东盟国家等低纬度地区性能更为优良。

四是北斗系统是全球第一个具备三频完整服务能力的导航系统,能够通过多频信号组合使用等方式提高定位精度和可靠性^[8]。

1.3 北斗系统应用现状

经过 20 多年的发展,北斗产业已经基本形成从芯片、终端到系统集成应用和运营的完整产业链。《中国卫星导航与位置服务产业发展白皮书(2019)》显示,2018 年我国卫星导航与位置服务产业总产值达 3016 亿元,产业核心产值达 1069 亿元,北斗对产业的核心产值贡献率达 80%。北斗产品已从军工国防应用扩展到交通运输、救灾减灾、精细农业、海洋渔业、气象预报、林业监管等民用领域的行业应用,并逐步向人民日常生活方面渗透。

在军工国防领域,北斗系统产品在部队已大范围普及,主要用于部队执行任务时的精确导航和定位、武器的精确制导、异常情况下的通信等^[9]。在民用领域,目前国家在大力推进北斗深度军民融合,推动北斗系统在民用领域的应用。在交通运输行业,交通运输部获批启动北斗应用首个示范项目,目前在公路、水路、铁路、邮政等方面应用效果良好。据中国交通运输部报道,全国已有超过 617 万辆道路营运车辆、3.5 万辆邮政和快递运输车辆、36 个城市约 8 万辆公交车、370 艘交通运输公务船舶使用或兼容北斗系统,提升了生产效率和经济效益,降低了资源消耗、运输成本,保障了交通及道路运输的安全。在救灾减灾方面,北斗系统首次应用于 2008 年汶川大地震的应急救援,救援部队在公共通信设施已瘫痪的情况下通过北斗短报文通信报告了灾情及受灾准确位置。民政部的北斗减灾应用平台应用于全国 31 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团,覆盖从部到村(社区)六级层级,研制部署了 5 万余台灾情直报型、车辆监控型及应急救援型三类终端,持续推进提升重大灾情应急救援的信息保障能力。在精细农业应用方面,北斗农业已在新疆生产建设兵团与黑龙江农垦大量应用,并逐步向北京、辽宁、湖北等十余省拓展。无人驾驶、精细插秧收割、变量播种、土地整理等前沿技术已引领现代农业产业发展。近年来共享单车、网约车、智能手机、北斗穿戴式设备等一系列北斗应用产品也不断在人们日常生活中涌现。北斗系统应用产业发展迅速,北斗卫星导航系统总设计师杨长风多次提出:“2035 年前,我国将以北斗系统为核心构建起覆盖空天地海、

高精度安全可靠、万物互联万物智能的新时空体系。”随着北斗系统的完善和服务能力的不断提升,以北斗系统的定位、授时、短报文通信技术服务为核心,基于5G技术、大数据、云计算、物联网、智能化等新兴技术的不断发展,北斗产业与各行业的应用模式创新及高度融合将引领北斗全产业链的发展,迎来北斗更加高速的发展时期。

2 勘探装备的北斗系统应用需求

相对于农业机械、交通运输工具等行业,地质勘探装备规模较小,发展相对较慢,但是因其显著的野外作业工作特点、矿产资源数据安全、地质勘探队伍管理水平的提升以及信息化智能化等新技术的高速发展与广泛应用,近年来,地质勘探装备的智能化、信息化需求日益强烈,北斗系统的建设和应用为满足上述需求提供了一条可行的道路。

2.1 地勘装备高质量发展的需求

地勘装备的高质量发展主要源于行业发展的3个重点变化:一是勘探作业新的趋势。全球地质勘探正在逐步从浅层到深部、从简单地质条件到复杂地质条件、从陆地到海域、从浅水区到深水区发展。二是勘探技术快速发展。钻探技术向大深度、复杂地层探索,物探技术和方法呈现高密度、网络化、分布式、节点式等发展特点。三是施工单位快速发展。地质勘探单位基于成本、效率和竞争力考虑,对地勘装备的水平和性能提升提出了更高的要求。地勘装备的高质量发展对于全天候、全天时的定位、授时、同步和通信具有较高要求。

2.2 地勘装备运维管理的需求

随着深部找矿战略的实施,地质勘查重点由浅表向深部、隐伏和难采区域拓展,地勘装备作业环境恶劣、偏远、信息阻断严重,运维管理成本高、难度大,充分利用北斗系统集成定位、授时、短报文通信于一体的优势,可以使地质装备野外工作的运维管理更加高效、快捷和方便,提高效率、降低成本。使用基于北斗卫星导航系统的授时、定位、短报文等服务,对装备制造企业而言,设备运行状态监控、设备故障提前预报、全生命周期售后服务、市场分析预测和大数据增值应用服务成为可能;对装备使用单位而言,可有效降低管理成本、实现高效的生产调度、完善设备维护计划、实现数据便捷处理。同时,基于同一数据源的线上数据实时共享,可实现装备制

造企业与使用单位的零距离接触,实现快速处理事故、提高服务质量和响应速度。

2.3 保障国家信息安全、保障国家战略安全的需求

目前地勘装备领域,尤其是物探仪器,大多使用基于GPS系统的产品,从国家战略角度考虑,尤其是当前中美贸易冲突的大环境下,作为国家重要的细分行业,存在极大的安全隐患。使用基于国产北斗导航系统的地勘装备等,进行地质调查、资源能源勘探等,可以确保资源、矿产采集勘探信息等不被监控,资源分布、探测深度等重要数据不会泄露等,确保国家信息安全。

3 地勘装备的北斗系统应用研究

基于北斗系统与地勘装备需求的优越功能匹配性、北斗系统的日益成熟和广泛应用以及地勘装备智能化信息化的强烈需求,中装集团作为我国地勘装备全产业链的龙头制造企业,“十三五”期间,结合国家重点研发计划项目和北斗导航专项,围绕地勘装备的北斗系统应用,部署了一系列应用研究和开发任务,取得了一定的进展。

3.1 总体思路

围绕地勘装备行业的供给侧改革和安全自主可控两大目标,坚持“创新、融合、提升、增值”,以北斗系统基础服务应用为出发点,结合地勘装备特点充分利用北斗系统特色服务,加强通信、网络、信息等新技术融合和标准引导,针对不同的应用条件、用户需求 and 产品形态,采用模块化设计理念,构建多层次、多方法、多用户类型对象的地勘装备北斗系统应用产品和服务体系。

3.2 总体技术框架

地勘装备的北斗系统应用,以建立地勘装备北斗系统位置授时通信数据标准规范为基础,分析地勘装备不同的应用条件、用户需求和产品形态下的北斗应用需求,自主研发组合式、模块化的不同功能终端,通过内嵌、前装或者后装方式集成在钻探、物探等地勘装备上,实现本地应用或者通过采取不同的通信方式组合(2G、3G、4G、5G以及有线、卫星通信等),传输到基于公有云或者私有云构建的后台云平台进行处理,结合用户不同的操作环境和需求,基于严格的权限管理体系,形成不同方式的数据呈现和交互系统。在系统大范围应用的基础上,可以基于北斗系统应用的大规模使用,形成海量数据,通过

大数据挖掘和分析,为地质勘探的数据增值服务奠定基础。总体技术框架详见图 1。

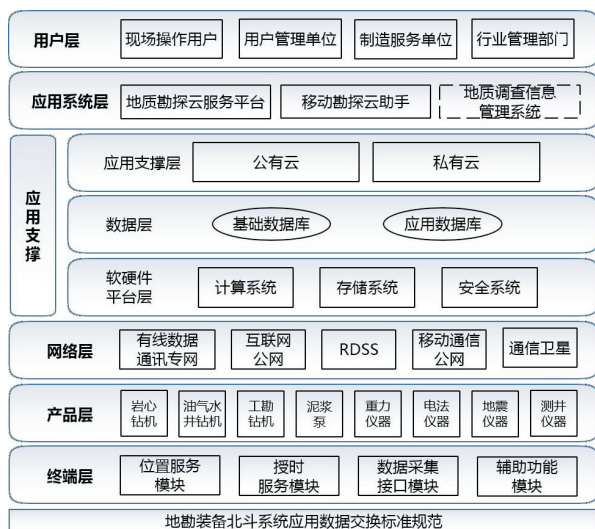


图 1 地勘装备北斗系统应用总体技术框架图

Fig.1 Overall technical framework of BDS application in geological exploration equipment

3.3 钻探装备北斗应用方案

钻探装备的北斗应用终端按照模块化方式,按不同的应用需求和应用环境,通过不同功能模块的组合,主要可以形成 3 类产品形态。

一是基本型应用终端,采用黑匣子形态,具有北斗/GPS 基本定位功能,定位精度为米级,选用低数据传输量的 2G 通信模块,体积小,无蓄电池可外接电源或使用太阳能电池,可通过地质勘探云服务平台对所安装钻探装备的位置进行实时获取和动态跟踪。

二是标准型应用终端,可作为监控终端外接不同传感器等采集钻探装备设备和工作参数,可将采集数据记录并通过数据传输量较高的 3G/4G 等通信模块传输至地质勘探云服务平台。无网络环境下可采用短报文通信模块进行数据传输。监控终端的主要监测数据包括:电机电流、大钩载荷、钻压、钻头扭矩、立轴转速、钻进速度、卡盘状态、泥浆泵流量、泥浆泵水压等。

三是定制型应用终端,根据用户需求定制钻探装备北斗终端,根据装备类别选用前装、后装或内置安装方式,定制终端的数据传输方式,实现位置信息、设备参数、运行状态、音视频实时显示等多功能应用。无网络环境可应用宽带通信卫星实现实时监控及数据传输。

图 2 为钻探装备北斗应用终端的硬件模块示意图,包括:

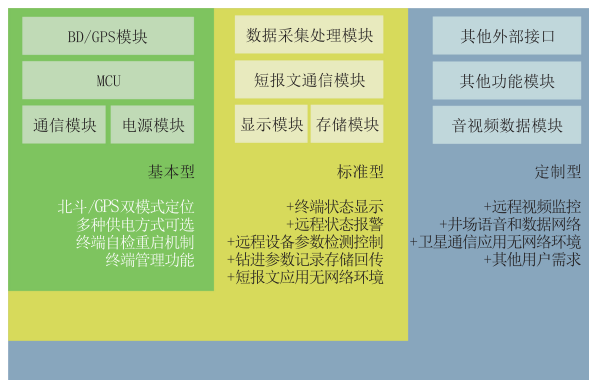


图 2 钻探装备北斗应用终端硬件模块示意图

Fig.2 Schematic diagram of application terminal hardware modules of BDS for drilling equipment

(1)MCU 系统:北斗终端的核心控制管理单元,完成对各功能接口及外围电路的配置、管理和控制,同时实现通信模块的驱动、协议与信息交互等。

(2)北斗定位导航模块:接收北斗/GPS/GLO 卫星信号,实现单系统独立定位及多系统联合定位。短报文通信功能根据钻探装备所在应用区域选用。

(3)通信模块:将采集到的数据通过无线的方式传输到云服务器或者用户电脑、手机端的模块,按不同的传输网络类型可分为 2G 模块、3G 模块、4G 模块、WIFI 模块、蓝牙模块等。2G 模块适用数据需求不高的终端,例如单纯的米级定位需求;3G 模块应用于数据量要求较高领域,例如设备参数的采集传输等;4G 模块适合速率要求更高的音、视频监控传输领域;WIFI、蓝牙等模块适用于传输距离比较近的数据采集。

(4)SIM 卡接口:插接用户识别模块(SIM)卡,使用 SIM 卡实现移动通信功能。

(5)电源模块:为 MCU、通信模块等提供稳定的工作电压,钻探装备无蓄电池的安装环境可以考虑使用太阳能发电或外接电源。

(6)数据采集模块:将安装在钻探装备上的压力、拉力、电流、行程、流量等不同传感器数据采集发送至 MCU。

(7)显示模块:终端的监测显示单元,包括监控显示屏等。

(8)音视频模块:根据产品应用需求选用该模块,包括高清摄像头、硬盘录像机等,实现野外现场状况远程实时监控功能。

(9)其他外部接口及功能模块:通过丰富的接口保证各种功能的正常运行。

需要特别指出的是,针对部分野外地质作业环境无网络通信条件的情况,除了可以采用北斗双向短报文通信功能实现简单管理功能外,中装集团依

托 IPSTAR 宽带通信卫星开发了一整套可实现野外作业现场的语音、视频、网络功能的井场作业及远程监控系统,图 3 为系统拓扑图,包括 IPSTAR 关口站、井场端站及主控中心。

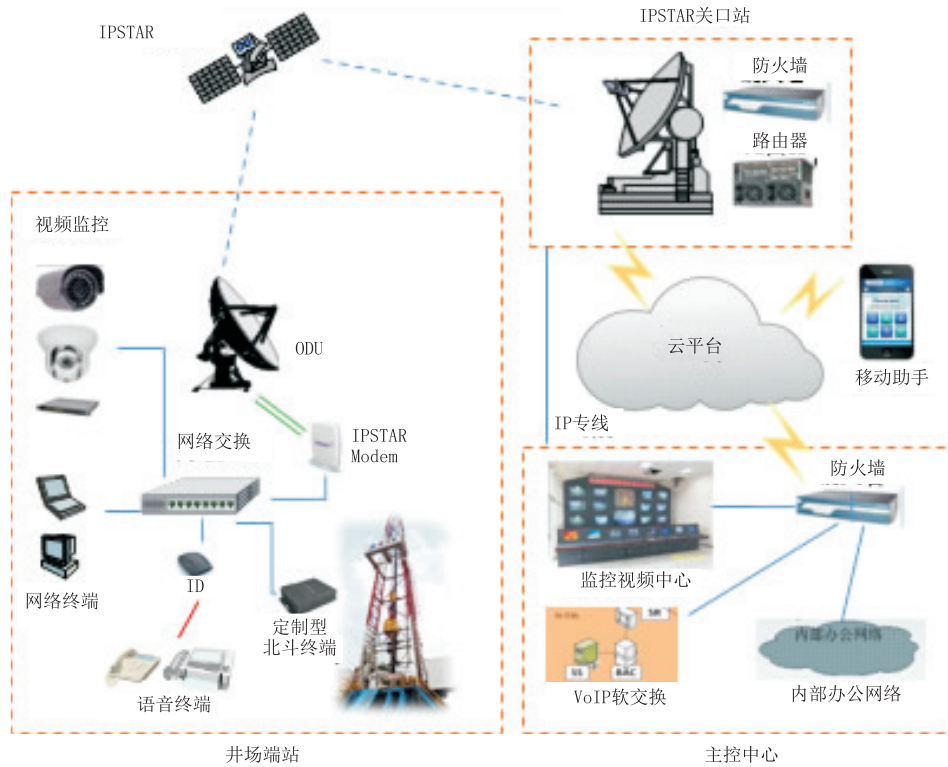


图 3 基于 IPSTAR 通信卫星的大型地质勘探作业现场通信和监控系统拓扑图

Fig.3 Topology of IPSTAR communication satellite based communication and monitoring system for large-scale geological exploration fields

(1)IPSTAR 关口站,提供 IPSTAR 通信卫星系统与主控中心之间的接口,为用户终端提供基于 IP 的包交换等。中国地区的关口站分别位于北京、上海和广州,相互之间通过地面光缆相连接,通信容量约 12 Gbps。

(2)井场端站,将安装或集成定制型北斗终端的钻探装备、摄像头、录像机等监控设备、语音终端、网络中断等通过网络交换机形成局域网,交换机通过 IPSTAR Modem(IPSTAR 室内单元)和 ODU(IPSTAR 室外发送/接收单元)接入 IPSTAR 宽带卫星,将采集到的钻探装备位置、运行状态、实时音视频等数据传输至 IPSTAR 卫星,IPSTAR 卫星转发至 IPSTAR 关口站后可通过铺设 IP 专线或互联网传输等方式等传输至地质勘探云服务平台。

(3)主控中心,作为监控视频中心和控制中心,并可接入内部办公系统等。

3.4 物探装备北斗应用方案

北斗系统在物探仪器中的应用,主要可以分为 3 类。

一是定位型应用,简单获取仪器所在位置信息。如在重力仪器中内置集成具有北斗/GPS 基本定位功能的北斗定位模块,定位精度为米级,用于实时获取测量点位置信息,用于固体潮计算从而对重力读数进行自动改正^[10]。

二是定位授时和同步应用,可满足地震仪器、电磁法仪器等米级、厘米级定位及秒级、微秒级、纳秒级授时等不同精度的应用需求,可精确获得所测站点的位置信息,同时利用北斗系统进行同步授时。地震仪器或电磁法仪器进行数据采集时,所有数据采集和控制站点需要同一时刻同步采集数据。北斗授时模块可在任意时刻根据北斗卫星的广播信息或者与北斗卫星地面中心站进行信息交互获得本地时

间与北斗标准时间的时间差,实现时间同步,并同时输出高精度的 1PPS 同步脉冲信号用于多通道数据采集与控制的同步^[11-12]。

三是综合应用。基于北斗短报文通信应用,结合移动通信技术,实现物探仪器工作状态检测、采集数据质量控制、设备参数远程配置、仪器防盗等功能,可覆盖移动通信盲区。图 4 为物探仪器分布式网络化工作模式拓扑图。在移动通信盲区,每个采集单元的仪器开机后通过短报文通信模块上传采集站基本信息及工作状态,北斗指挥机接收信息并传至主控中心上位机,可通过主控中心上位机查看所有仪器的运行状态。所有仪器开机后,主控中心通过北斗指挥机发布监控命令,采集单元接收命令后根据指令完成相应数据采集操作,将采集信息及数据反馈回主控中心。在移动网络覆盖区,每个采集单元可通过内置的 4G 或其他移动通信模块连接到主控中心的网络服务器,实现数据采集传输^[13-15],对接地勘装备北斗监控与信息服务平台。

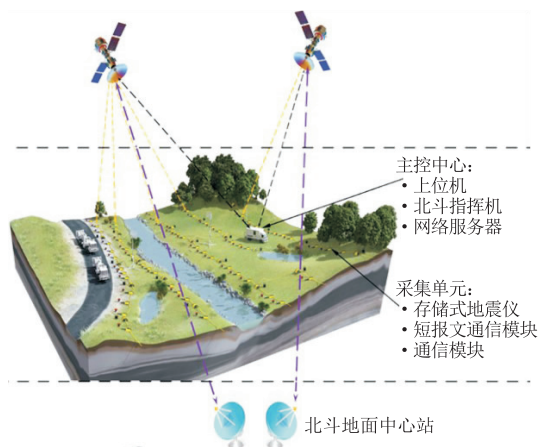


图 4 物探仪器装备分布式网络化工作模式拓扑图

Fig.4 Topology of distributed networked working mode for geophysical prospecting instrumentation

3.5 勘探装备北斗监控和信息服务平台

地勘装备北斗监控与信息服务平台基于前装/后装或内置北斗终端/模块获得地勘装备的位置、时间、状态等数据信息,可以实现面向地质装备制造单位实现对钻探设备动态数据的监控和分析,以及设备故障的远程诊断功能,为建立全国范围的地质装备运营大数据应用奠定基础;面向用户使用单位实现远程作业监控、指挥、调度,为钻探单位提供“私有云”服务。同时,在不具备移动通信信号的偏僻野外作业场地,可具有数据交换和语音交换通信环境;通

过集成北斗/GNSS 地质装备的大规模部署和应用,帮助国家地质勘探行业管理部门了解全国勘探工作整体情况、设备开工情况等,为政府管理部门和企业决策提供数据支撑、预测市场未来发展趋势。平台主要功能如下:

(1)网络查询及地图总览:在系统平台上,通过浏览器,在网上随时浏览地质装备编号、所属单位、当前工作地点及运行状态等。

(2)设备管理:对地质装备的工程数据、设备数据实现动态监控,实现工况数据采集,可根据具体客户需求提供不同类型的数据,包括仪表盘显示、曲线显示、数值显示等。

(3)设备远程故障诊断及预警:钻探装备可以将现场状况以视频形式传输给项目负责人、技术服务人员和专家,并可通过音频功能与现场工作人员进行沟通,判断现场故障信息;可实现装备实时报警。

(4)远程数据回收:利用数据采集或短报文通信功能,根据用户需求可实现钻探装备、物探仪器野外施工作业采集数据的实时回传或定时回传,使远程监控野外采集数据质量、集中处理解释野外数据成为可能。

(5)历史报表及实时报表:对地质装备工况、作业人员、钻进参数等相关数据进行记录及汇总形成班报表。

(6)历史数据查询功能:通过时序数据库存储历史数据,并提供历史数据的查询。

(7)用户权限管理功能:按照用户管理级别为用户分级授权,通过不同级别的账号登录,基于系统平台的数据、视频等资源,实现不同用户所辖地质装备的有效管理。同一级别用户之间相互独立;上一级用户可以管理下一级用户,权限越高的上级用户可以查看更多资源。

(8)平台可兼容各种 PC 端、智能手机 APP 客户端等。

4 结语

按照“服务地勘、创新应用、增值引导、产业带动”的原则,基于我国自主研发建设运营的北斗定位导航系统,融合移动通信、互联网和卫星通信等技术,结合地勘装备智能化、信息化的要求,重点部署前端模块终端和后端应用平台研发,并以大数据、云计算等为支撑,强化地勘装备数据化和服务化,是地

勘装备制造行业推进产品结构调整和转型升级,提升地勘装备安全、高效、绿色、智能水平,实施地质装备供给侧结构性改革的重要方向。

参考文献(References):

- [1] 杨军,曹冲,周儒欣.我国卫星导航系统应用现状和发展趋势[J].科技进步与对策,2004,21(4):114-115.
YANG Jun, CAO Chong, ZHOU Ruxin. Application status and development trend of satellite navigation systems in China[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2004,21(4): 114-115.
- [2] 黄浩,蔡戩,王卫东,等.北斗导航产品应用及发展现状分析[J].电脑知识与技术,2017,13(33):273-274.
HUANG Hao, CAI Jian, WANG Weidong, et al. Application and development status analysis of BeiDou navigation products[J]. Computer Knowledge and Technology, 2017,13(33):273-274.
- [3] 谭述森.北斗系统创新发展与前景预测[J].测绘学报,2017,46(10):1284-1289.
TAN Shusen. Innovative development and forecast of BeiDou System[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017,46(10):1284-1289.
- [4] 北斗卫星导航系统发展报告(3.0版)中文版[R].北京:中国卫星导航系统管理办公室,2018.
Development of the BeiDou Navigation Satellite System (Version 3.0)[R]. Beijing: China Navigation Satellite System Management Office, 2018.
- [5] BDS-OS-PS-2.0,北斗卫星导航系统公开服务性能规范(2.0版)[S].
BDS-OS-PS-2.0, BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Specification (Version 2.0)[S].
- [6] 张志峰,李中学.应急状况下北斗短报文通信功能的应用[J].计算机测量与控制,2018,26(10):276-279,285.
ZHANG Zhifeng, LI Zhongxue. Application of short message communication function of BeiDou in emergency situation[J]. Computer Measurement & Control, 2018,26(10):276-279, 285.
- [7] 何若枫.从卫星导航系统的发展看我国北斗系统的后发优势[J].长沙航空职业技术学院学报,2016,16(4):49-53.
HE Ruofeng. From the development of satellite navigation system to see the advantage of backwardness of China BeiDou System[J]. Journal of Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, 2016,16(4):49-53.
- [8] 杨军,曹冲.我国北斗卫星导航系统应用需求及效益分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(9):775-778.
YANG Jun, CAO Chong. Market forecast and benefit analysis of application of BeiDou Navigation Satellite System in China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004,29(9):775-778.
- [9] 王昊,孙思远.浅析北斗卫星导航系统在军事领域的应用[J].科技创新与应用,2015(2):71.
WANG Hao, SUN Siyuan. Military application of BeiDou Navigation Satellite System[J]. Technology Innovation and Application, 2015(2):71.
- [10] 刘国栋.矿产资源调查的物探方法和仪器设备[J].物探与化探,2007,31(S1):35-40,52.
LIU Guodong. Geophysical methods and instruments for mineral resource survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007,31(S1):35-40,52.
- [11] 姬智艳.瞬变电磁探测系统的GPS时钟同步研究与应用[D].长沙:湖南大学,2013.
JI Zhiyan. Study and implement on GPS time synchronization of the transient electromagnetic detection system[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [12] BD 420006-2015,北斗/全球卫星导航系统(GNSS)定时单元性能要求及测试方法[S].
BD 420006-2015, Performance requirements and testing methods for BeiDou/Global Navigation Satellite System (GNSS) timing unit[S].
- [13] 赵玉江,林君,张晓普,等.无缆存储式地震仪远程质量监控技术研究[C]//2014年中国地球科学联合学术年会论文集.北京:中国地球物理学会,中国地质学会,2014:2942-2945.
ZHAO Yujiang, LIN Jun, ZHANG Xiaopu, et al. Research on remote quality monitoring technology of cable-free storage seismograph[C]// Proceedings of 2014 Annual Meeting of Chinese Geoscience Union. Beijing: Chinese Geophysical Society, Geological Society of China, 2014:2942-2945.
- [14] 张晓普,林君,杨泓渊,等.基于无线网络的无缆地震仪远程监控系统[J].自动化仪表,2016,37(2):49-53.
ZHANG Xiaopu, LIN Jun, YANG Hongyuan, et al. Remote monitoring system of cable-less seismograph based on wireless network[J]. Process Automation Instrumentation, 2016,37(2):49-53.
- [15] 赵玉江.基于北斗和GPRS的无缆地震仪远程监控系统的设计与实现[D].长春:吉林大学,2015.
ZHAO Yujiang. Design and implementation of remote monitoring system of cable-less seismograph based on BeiDou System and GPRS[D]. Changchun: Jilin University, 2015.

(编辑 王建华)